

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет електроенергетики та електромеханіки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

**Магістерська кваліфікаційна робота на тему:**

«ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ  
СТАНЦІЇ»

Виконав: студент 2 курсу, гр. ЕПА-24м  
спеціальності 141 – Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка  
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Андрій КОРИТНИЙ  
(ім'я ПРІЗВИЩЕ, підпис)

Керівник: к.т.н., ст. викл. каф. КЕМСК  
Вадим БОМБИК  
(ім'я ПРІЗВИЩЕ, підпис)

«25» листопада 2025 р.

Опонент: к.т.н., доц., доцент ЕСЕСМ  
Олександр Бабенко  
(прізвище та ініціали)

«16» грудня 2025 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри

«25» 16 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 рік

Вінницький національний технічний університет  
Факультет Електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Галузь знань 141-Електрична інженерія  
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Освітньо-професійна програма «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**

к.т.н., доц.

Микола МОШНОРІЗ

14 10 2025 року

### **ЗАВДАННЯ**

#### **НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Коритному Андрію Віталійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Електромеханічна система керування сонячної фотоелектричної станції.

Керівник роботи Бомбик Вадим Сергійович, к.т.н., ст. викл. каф.КЕМСК  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від від “29” 09 2025 року №313

2. Термін подання студентом роботи 25.11.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Технічна документація та перелік літературних джерел, що стосуються опису та характеристик електромеханічної системи керування сонячної фотоелектричної станції.

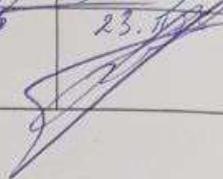
4. Зміст текстової частини: Вступ. 1 Аналіз сучасного стану використання сонячних фотоелектричних систем. 2 Розробка електромеханічної системи керування сонячної фотоелектричної станції. 3 Модернізація електромеханічної системи керування сонячної фотоелектричної станції. 4 Техніко-економічне обґрунтування вибору електромеханічної системи керування сонячної фотоелектричної станції. 5 Охорона праці. Висновки

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

Об'єкт, предмет, мета та задачі дослідження; Теоретичні основи розробки системи керування сонячною електричною станцією; Види сонячних електростанцій; Аналіз існуючих систем керування електромеханічними системами керування сонячної фотоелектричної станції; Техніко-економічне

обґрунтування впровадження системи керування сонячною електричною станцією; Висновки.

6. Консультанти розділів роботи

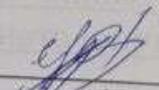
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Спеціальна частина	к.т.н., ст. каф. КЕМСК Бомбик В. С.	23.10.25 	23.11.25 
Економічна частина	к.т.н., доц. каф. ЕСЕЕМ Шулле Ю.А.	23.10.25 	23.11.25 

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми МКР (МКР)	24.09.25р.	Вик
2	Виконання спеціальної частини МКР. Перший рубіжний контроль виконання МКР	29.10.25р	Вик
3	Виконання спеціальної частини МКР. Другий рубіжний контроль виконання МКР	23.11.25р	Вик
4	Виконання розділу «Економічна частина»	23.11.25р	Вик
5	Виконання розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	23.11.25р	Вик
6	Нормоконтроль МКР	23.11.25р	Вик
7	Попередній захист МКР	24.11.25р	Вик
8	Рецензування МКР	16.12.25р	Вик
9	Захист МКР	23.12.25р	Вик

Студент

  
(підпис)

Керівник роботи

  
(підпис)

Коритний А.В.  
(прізвище та ініціали)

Бомбик В.С.  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

УДК 621.47:621.3.019.3

Коритний А. В. Електромеханічна система керування сонячної фотоелектричної станції. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма – електрична інженерія. Вінниця: ВНТУ, 2025. 104 с. Бібліогр.:35 назв; рис.: 19; табл. 25.

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена розробці та обґрунтуванню впровадження електромеханічної системи керування для сонячної фотоелектричної станції (ФЕС) з метою підвищення її ефективності та збільшення обсягу електроенергії, яку можна використовувати для потреб підприємства, на прикладі ТОВ «Вінницька птахофабрика».

Актуальність теми підкреслюється розвитком сонячної енергетики і необхідністю покращення енергоефективності в умовах нестабільності традиційних енергетичних мереж. Доведено, що звичайні установки ФЕС, незважаючи на економічні переваги, втрачають до 35% можливого виробництва енергії через зміну кута падіння сонячних променів. Виконано аналіз сучасного стану використання ФЕС, що підтверджує можливість збільшення щорічного виробітку енергії на 30–40 % за рахунок впровадження двовісних систем трекінгу.

Створено алгоритм активної системи трекінгу на основі мікроконтролера Arduino Uno та чотирьох фоторезисторів, який забезпечує реактивне відстеження сонця, що є демонстраційною моделлю для подальшого вдосконалення. Доведено, що застосування машинного навчання (ML) для прогнозування змін клімату дозволяє виконувати проактивне регулювання кутів сонячних панелей на основі прогнозу погоди та хмарності, що зменшує навантаження на механізми.

Графічна частина складається з 14 плакатів із результатами роботи.

**Ключові слова:** сонячна фотоелектрична станція (ФЕС), трекінгова система, електромеханічна система керування, енергоефективність, генерація, мікроконтролер Arduino, Machine Learning (ML), техніко-економічне обґрунтування, окупність.

## ABSTRACT

UDC: 621.47:621.3.019.3

Korytny A. V. Electromechanical control system of a solar photovoltaic station. Master's qualification work in the specialty 141 - Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics, educational program – electrical engineering. Vinnytsia: VNTU, 2025. 104 p. Bibliography: 35 titles; Fig.: 19; Table. 25.

The master's qualification work is devoted to the development and justification of the implementation of an electromechanical control system for a solar photovoltaic station (PVS) in order to increase its efficiency and increase the amount of electricity that can be used for the needs of the enterprise, using the example of LLC "Vinnytsia Poultry Farm".

The relevance of the topic is emphasized by the development of solar energy and the need to improve energy efficiency in the conditions of instability of traditional energy networks. It is proven that conventional photovoltaic installations, despite economic advantages, lose up to 35% of the possible energy production due to a change in the angle of incidence of solar rays. An analysis of the current state of photovoltaic use has been performed, which confirms the possibility of increasing annual energy production by 30–40% through the implementation of two-axis tracking systems. An algorithm for an active tracking system based on an Arduino Uno microcontroller and four photoresistors has been created, which provides reactive tracking of the Sun, which is a demonstration model for further improvement. It is proven that the use of machine learning (ML) for predicting climate change allows for proactive adjustment of the angles of solar panels based on weather and cloudiness forecasts, which reduces the load on the mechanisms.

**Keywords:** solar photovoltaic station (PVS), tracking system, electromechanical control system, energy efficiency, generation, Arduino microcontroller, Machine Learning (ML), feasibility study, payback.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ .....	7
1.1 Аналіз принципу роботи та типу сонячних панелей .....	11
1.2 Типові рішення побудови сонячних станцій .....	13
1.3 Аналіз сонячного випромінювання на поверхню Землі.....	16
1.4 Випромінювання на похилих та відстежуючих поверхнях .....	18
1.5 Методи відстеження сонця .....	22
2 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ .....	25
2.1 Обґрунтування вибору трекінгової системи .....	25
2.2 Загальна характеристика електромеханічної системи сонячного трекера .....	25
2.2.1 Принцип побудови систем управління поворотом сонячних батарей ...	26
2.2.2 Система управління поворотом сонячних панелей на базі годинникового механізму .....	28
2.2 Вибір апаратної частини трекінгової системи .....	29
2.3 Склад компонентів макету та їх підключення .....	34
2.4 Розробка алгоритму та програми трекера.....	38
2.4 Проведення експериментів та результати дослідження.....	40
3 МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ .....	51
4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ .....	71
4.1 Технічне обґрунтування вибору складових електромеханічної системи .....	71

4.2 Економічне обґрунтування вибору складових електромеханічної системи керування сонячної фотоелектричної станції.....	73
4.2.1 Визначення капітальних вкладень.....	73
4.2.2 Розрахунок заробітної плати обслуговуючого персоналу .....	75
4.2.3 Розрахунок витрат на поточний ремонт обладнання .....	77
4.3 Розрахунок терміну окупності.....	79
5 ОХОРОНА ПРАЦІ .....	822
5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта.....	83
5.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць .....	83
5.1.2 Електробезпека .....	86
5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії .....	86
5.2.1 Мікроклімат .....	86
5.2.2 Склад повітря робочої зони .....	87
5.2.3 Виробниче освітлення.....	88
5.2.4 Виробничий шум.....	89
5.2.5 Виробничі вібрації.....	90
5.3 Пожежна безпека.....	91
ВИСНОВКИ .....	94
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	96
Додаток А Технічне завдання.....	100
Додаток Б Графічна частина.....	103
Додаток В Протокол перевірки дипломної роботи на наявність текстових запозичень .....	117

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Електрична енергія сьогодні є невід'ємною складовою людського життя, забезпечуючи розвиток і комфорт. Однак виробництво енергії з традиційних джерел має значний негативний вплив на екологію та стає дедалі дорожчим. Альтернативна енергетика охоплює всі види джерел енергії, які є заміною викопному паливу, зокрема сонячну, гідроелектричну, геотермальну та вітрову енергію. Використання таких джерел дозволяє суттєво зменшити шкідливі викиди у навколишнє середовище та знижує залежність від палива у процесі генерації енергії. Розвиток сонячної енергетики є ключовим напрямом для України.

Це пов'язано не лише з поступовим виснаженням традиційних енергоресурсів чи збільшенням впливу на довкілля, а й із постійним зростанням цін на електроенергію та нестабільністю роботи електромереж. Такі обставини сприяють тому, що дедалі більше підприємств прагнуть забезпечувати себе власною енергією, скорочуючи витрати та підвищуючи автономність в умовах перебоїв із зовнішнім постачанням.

Сучасні тенденції в енергетиці спрямовані на впровадження відновлюваних джерел енергії, що сприяє підвищенню енергоефективності та зниженню рівня вуглецевого сліду. Так, ТОВ «Вінницька птахофабрика» є прикладом успішної інтеграції фотоелектричних систем у свою промислову інфраструктуру. Завдяки встановленню сонячних електростанцій підприємство вже досягло покриття 25% власних потреб в електроенергії у 2024–2025 роках, заощадивши при цьому 1,2 млн гривень.

Подальше вдосконалення таких систем із використанням електромеханічних систем управління дозволить ще більше оптимізувати витрати та ефективніше використовувати сонячну енергію для власних потреб.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є розробка електромеханічної системи керування сонячної фотоелектричної станції в умовах товариства з обмеженою відповідальністю «Вінницька птахофабрика». Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі **задачі**:

- зробити аналіз існуючих електромеханічних системи керування сонячної фотоелектричної станції;
- розробити схему електричну принципову системи керування сонячної фотоелектричної станції;
- розробити алгоритм роботи пристрою відслідковування положення сонця;
- вибрати елементи електромеханічної системи керування;
- написати програму керування відслідковувачем положення сонця.

**Об'єкт дослідження:** процес керування положенням сонячних панелей відносно сонця за допомогою електромеханічної системи керування.

**Предмет дослідження:** метод визначення положення сонячних панелей відносно сонця за допомогою машинного навчання та засобів прогнозування на основі історичних даних.

**Методи досліджень** базуються на використанні математичного апарату теорії вимірювального перетворення, теорії електричних кіл, а також на використанні методів комп'ютерного моделювання цифрових схем та чисельних методів розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Отримав подальший розвиток метод визначення положення сонячних панелей відносно сонця за допомогою машинного навчання.

**Практичне значення одержаних результатів.**

Було взято участь у VI міжнародній науково-технічній конференції Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2025), Вінниця, 22-23 жовтня 2025 р за результатами якої були опубліковані 1 тези доповіді [1].

## **1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ**

Сонячна енергія – це невичерпне джерело енергії, яке значно перевищує за потужністю всі світові запаси викопного палива. Використання лише 0,0125% енергії що надходить, може задовольнити нинішні потреби у світовій енергії, а використання 0,5% здатне покрити повністю теперішні потреби та згодом і майбутні.

Переваги сонячної енергії:

1. Відсутність викидів парникових газів та інших шкідливих речовин, а саме сонячні панелі не генерують викидів під час роботи, що робить їх екологічно чистим джерелом енергії.

2. Відсутність теплового ефекту, на відміну від спалювання викопного палива, сонячна енергія не сприяє глобальному потеплінню.

3. Позитивний вплив на якість повітря, енергія, що надходить від сонця не забруднює повітря, на відміну від традиційних видів енергетики.

Недоліки сонячної енергії:

1. Залежність від атмосферних умов, Кількість сонячної енергії на пряму залежить від погодних умов, часу доби та року.

2. Висока вартість, установка сонячної електростанції може досягати великих сум.

Згідно Прогнозу розвитку SolarPower Europe – ринок сонячної енергетики буде стрімко зростати до 2027 року, основним стимулом такого зростання обумовлений падінням цін на сонячні панелі та інвертора та зростанням у людей екологічної свідомості та політикою держав щодо заощадження енергоресурсів. На рисунку 1.1 показано прогноз SolarPower Europe щодо зростання ринку сонячної енергетики у країнах Європи до 2027 року.

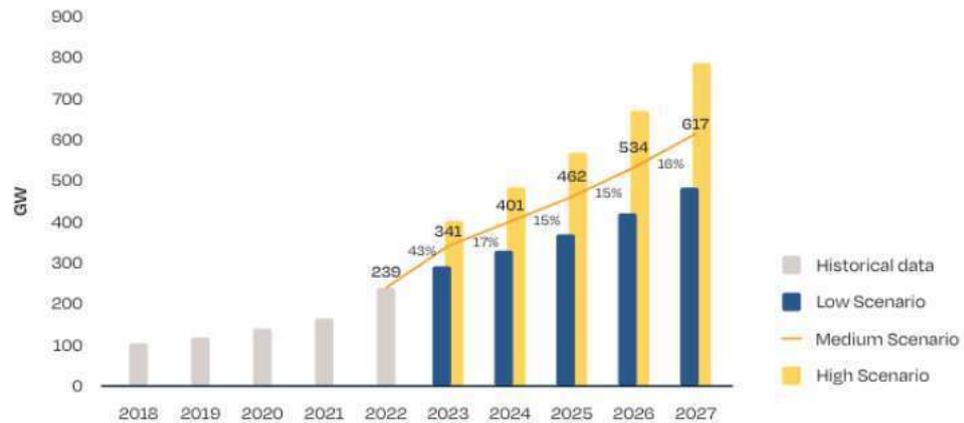


Рисунок 1.1 – Прогноз зростання ринку сонячної енергетики

Аналіз графіка свідчить про те, що ринок сонячної енергетики подвоїться у порівнянні з поточними даними. За середнім прогнозом, обсяг світового ринку сонячної енергії досягне 400 ГВт у 2024 році, демонструючи зростання на 17% від рівня 341 ГВт, доданих у 2023 році. У період 2024–2027 років три головні ринки сонячної енергетики – Китай, Сполучені Штати та Індія – забезпечать 51–57% глобального попиту на сонячну енергію, що трохи менше очікуваного показника в 58% на 2023 рік. Прогнозується, що до 2027 року ці країни сумарно досягнуть встановленої потужності у 313 ГВт.

Останні роки показують зростання кількості постачальників сонячних систем, які допомагають бізнесам впроваджувати рішення на основі сонячної енергії. Індустріальні сонячні електростанції стають стратегічно вигідною альтернативою традиційним джерелам енергопостачання, успішно задовольняючи енергетичні потреби підприємств. Сучасні технології дозволяють широко застосовувати сонячні системи в різних промислових галузях, сприяючи створенню стійких бізнес-моделей. Здешевлення тарифів на сонячну електроенергію порівняно з традиційними джерелами робить її конкурентоспроможною, при цьому зниження витрат та податкові пільги додатково стимулюють перехід на відновлювані джерела енергії.

Ринок сонячної енергетики демонструє не лише економічну вигоду від її застосування, але й підтримку екологічних стандартів та підвищення ефективності підприємств. За останні десятиліття сонячна енергія стала одним із ключових джерел електроенергії, а також важливим чинником у глобальному переході до екологічно чистих та стійких енергосистем. Вона не лише здатна вирішувати сучасні енергетичні виклики, але й відіграє центральну роль у трансформації енергетичного сектору.

Однією з головних переваг сонячної енергії є її стабільність і відновлюваність. Завдяки фотовольтаїчним елементам, які перетворюють сонячне випромінювання на електричний струм, панелі можуть генерувати енергію навіть у похмуру погоду. Це забезпечує неперервність постачання електроенергії, що робить сонячну енергетику більш надійною порівняно з іншими джерелами, такими як вітрова чи гідроенергетика, які залежать від специфічних природних умов.

Фотовольтаїчні технології зазнали суттєвих удосконалень, що дозволило значно підвищити їх ефективність у перетворенні сонячної енергії на електрику. Впровадження наноматеріалів і тонкоплівкових технологій уможливило створення високопродуктивних панелей, які легко інтегруються в різноманітні структури: фасади будівель, дахи чи навіть електроніку. Ці інновації сприяють більш раціональному використанню землі та інших ресурсів для генерації електроенергії. Подальший розвиток цих технологій спрямований на підвищення продуктивності та скорочення витрат на виробництво.

Сонячна енергетика сьогодні є ключовим компонентом відновлюваної енергетики та пропонує ефективне рішення для задоволення потреб сучасних підприємств. Інновації у цій сфері відкривають нові перспективи для подальшого розвитку енергетики, сприяючи створенню стійкої, екологічно чистої та технологічно прогресивної енергосистеми. Посеред усяких альтернативних джерел енергії, які можуть бути вживані в промислових

енергетичних системах, сонячна енергія виділяється як практичне, функціональне та фінансово вигідне рішення. Обирання технології відновлюваної енергії, що підходить для промислових та лабораторних виробничих процесів, залежить від декількох факторів:

1. Тип енергії: Який тип енергії потрібен для виробництва (теплова, електрична, механічна)?
2. Відновлюване джерело енергії: Який тип відновлюваного джерела енергії доступний (сонячне випромінювання, вітер, вода)?
3. Потенціал: Який потенціал генерації енергії з даного джерела?
4. Інфраструктура: Чи існують необхідні фізичні та технічні можливості для інтеграції технології.

Сонячна енергія має значні переваги в кожному з цих аспектів:

1. Універсальність: Сонячна енергія може бути перетворена на різні типи енергії, що робить її гнучкою для використання в різних промислових процесах.
2. Доступність: Сонячне випромінювання є широко доступним та рясним ресурсом у багатьох регіонах світу.
3. Масштабованість: Системи сонячної енергії можуть бути побудовані будь-якого розміру, від невеликих дахових установок до масштабних промислових парків.
4. Економічна вигода: Вартість сонячних технологій значно знизилася протягом останніх років, роблячи їх економічно конкурентоспроможними з традиційними джерелами енергії.

Зважаючи на ці переваги, сонячна енергія стає все більш привабливим вибором для промислових підприємств, що прагнуть до екологічно чистого та стійкого енергопостачання.

Україна – це країна, де в середньому 2609 сонячних годин на рік. Тобто країна, яка проводить близько 30% року на сонці. Україна зробила важливі кроки з розширення використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). І

альтернативні види палива як частина більш широкої стратегії зменшення залежності від традиційного викопного палива. За оцінками, до 2030 року наша країна зможе збільшити використання відновлюваних джерел енергії в 10 разів і скоротити споживання природного газу на 15%. Варто зазначити, що клімат та географічне розташування України прихильні для розвитку сонячної енергетики та зведення СЕС. Навіть північні області країни мають значний потенціал для розвитку цієї сфери, що не поступається більшості європейських регіонів.

Розвиток сонячної енергетики в Україні наразі перебуває на етапі, який країни Європи подолали приблизно 7-10 років тому. У той же час у нас є одна з найпривабливіших інвестиційних структур в Європі для розвитку галузі. Дійсно, ось список заходів, які необхідно вжити для досягнення 25% виробництва чистої енергії до 2035 року, включаючи доступність ресурсів і ділянок, пільгові тарифи, державну підтримку і цільові енергетичні стратегії.

### **1.1 Аналіз принципу роботи та типу сонячних панелей**

Сонячна батарея – це поширений термін у побутовій мові й ненаукових джерелах. Він зазвичай позначає комплекс фотоелектричних перетворювачів (фотоелементів) – напівпровідникових пристроїв, які безпосередньо перетворюють сонячне випромінювання на постійний електричний струм. На відміну від сонячних колекторів, що слугують для нагрівання теплоносія, сонячна батарея генерує електрику. Проте й сонячні колектори можуть застосовуватися для виробництва електроенергії – накопичене тепло використовують як джерело енергії для електрогенерації. Великі установки, які концентрують сонячне випромінювання для запуску різного типу теплових машин (наприклад, парових, газотурбінних або термоелектричних), отримали назву геліоелектростанцій.

Різноманітні пристрої, які дозволяють перетворювати сонячну енергію в тепло та електрику, є предметом вивчення геліоенергетики. Виробництво

сонячних елементів і колекторів стрімко набирає обертів у різних напрямках розвитку. Сонячні батареї представлені в широкому діапазоні розмірів – від мініатюрних, які інтегруються в калькулятори, до великих, що покривають дахи будинків чи автомобілів. Зростання популярності сонячних панелей серед власників приватних будинків привернуло значну увагу до особливостей їхньої роботи та факторів, що забезпечують високу ефективність цих пристроїв. Принцип роботи фотоелектричних панелей базується на фотовольтаїчному ефекті, який виникає у неоднорідних напівпровідникових структурах під впливом сонячного випромінювання.

Суть цього явища полягає у створенні неоднорідності напівпровідника через легування його різними домішками (процес утворення р-п переходів) або шляхом комбінування напівпровідників із певною забороненою зоною. Крім того, застосовуються комбіновані методи для підвищення ефективності. Результативність перетворення енергії залежить від електрофізичних характеристик напівпровідникової структури та оптичних властивостей панелі. Важливим є явище фотопровідності, що визначається внутрішнім фотоефектом, який проявляється у напівпровідниках під дією сонячного світла.

Сонячна енергетика базується на двох основних методах перетворення енергії. Перший – фототермічний, де в сонячному колекторі теплоносії нагрівається до високих температур, використовуючись для опалення або гарячого водопостачання. Другий метод – фотоелектричний: пряме перетворення світла в електричний струм через напівпровідникові фотоелементи.

Сонячні батареї складаються з модулів на основі кремнієвих кристалів і можуть мати різну конструкцію та потужність залежно від сфери використання. Вони слугують джерелом автономного електропостачання. Класифікація сонячних елементів здійснюється за структурою кремнієвого кристала: їх поділяють на монокристалічні, полікристалічні та аморфні.

Монокристалічні сонячні батареї виготовляються з високочистого кремнію, широко застосовуваного в напівпровідниковій промисловості. Монокристал формується шляхом витягування на спеціальному насінні з кремнієвого розплаву. Отримані стержні розрізають на тонкі пластини товщиною 0,2-0,4 мм, які стають основою чарунок. Для досягнення оптимальної продуктивності зазвичай використовують 36 штук. Завдяки своїй ефективності та надійності, батареї на основі монокристалічного кремнію є найбільш популярними. Їхній коефіцієнт корисної дії складає 14-17%.

Полікристалічні сонячні батареї виготовляються з кремнію, що утворюється шляхом поступового охолодження кремнієвого розплаву. Цей метод є менш енерговитратним і економічно вигіднішим. Кремній для таких батарей має характерний яскраво-синій колір. Коефіцієнт корисної дії (ККД) полікристалічних батарей становить 10-12%.

Акумулятори з аморфного кремнію виробляють за технологією випаровуючої стадії. У цьому процесі тонкий шар кремнію наноситься на поверхню опорного матеріалу і захищається спеціальним покриттям. Завдяки такому підходу їх також називають тонкоплівковими акумуляторами. Цей спосіб виробництва найпростіший та недорогий, проте ККД акумулятора помітно менше, ніж у кристалічних батарей, до того ж елементи з аморфного кремнію схильні до явища деградації. Функціонують тонкоплівкові акумулятори при розсіяному випромінюванні, монтуються на стіни споруд.

## **1.2 Типові рішення побудови сонячних станцій**

Розглянемо декілька видів побудови сонячних станцій на різних системах кріплення:

1. Дахові СЕС;
2. Наземні СЕС;
3. Трекінгові СЕС;
4. Плавучі сонячні станції.

Дахові системи кріплення використовуються для встановлення сонячних панелей на дахах будівель. Вони можуть бути зроблені зі сталі, алюмінію або інших матеріалів і можуть бути призначені для різних типів дахів (пласких, нахилених, металевих, шиферних тощо). На рисунку 1.2 зображено систему кріплення СЕС для пласких дахів.



Рисунок 1.2 – Баластна система кріплення для пласких дахів

Баластна система кріплення сонячних панелей – це універсальний та варіант монтажу фотомодулів на плоских дахах. Ця система не потребує кріплення до конструкції даху, що робить її гнучким та простим у встановленні рішенням. Баластна система складається з опорних трикутників баластних блоків виготовлених з бетону (розміри блоку підбираються враховуючи дані про вітрове навантаження та висоту будівлі) тому через те що система просто розміщується на покрівлі вона не призводить до часткової розгерметизації покриття.

Системи кріплення для скатних покрівель – це тип конструкції, призначений для монтажу сонячних панелей на похилих дахах. За допомогою комплекту несучих профілів, притискних елементів ФЕМ та кріплення яке засвердлюється в профілі або кроквяну конструкцію покрівлі. На відміну від

баластної системи такий вид кріплення передбачає герметизацію, так як здійснюється часткова розгерметизація на покрівлі з метою закріплення до каркасу даху. На рисунку 1.3 зображено систему кріплення для скатного даху.



Рисунок 1.3 – Система кріплення для скатного даху

На землі сонячні електростанції (НЗСЕС) – це сонячні електростанції, які розташовані на земельній поверхні, незалежно від її типу, такі як сільськогосподарські землі, пустельні площі, промислові майдани або інші відкриті простори. Вони можуть бути великими або малими за площею, в залежності від потужності та потреб споживачів.

Основні складові НЗСЕС включають в себе сонячні панелі (фотоелектричні модулі), монтажні конструкції (столи), інвертори для перетворення постійного струму, що генерується сонячними панелями, в змінний струм, а також трансформатори та інші компоненти для підключення до електричної мережі. Такі станції можуть бути розгорнуті у великих масштабах, що робить їх ефективними для генерації великих обсягів електроенергії та забезпечення стійкого джерела сонячної енергії для місцевих та віддалених споживачів. На рисунку 1.4 зобразимо вигляд наземної сонячної електростанції.



Рисунок 1.4 – Наземна система кріплення СЕС

Трекінгові сонячні електростанції (трекер сонячний) – Сонячний трекер – це електромеханічна система, яка здійснює орієнтацію сонячних панелей на Сонце. Вона відстежує рух Сонця по небосхилу та керує сервоприводом, що забезпечує поворот панелей у потрібному напрямку. Трекінгова СЕС зображена на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5 – Сонячний трекер

### **1.3 Аналіз сонячного випромінювання на поверхню Землі**

Земля здійснює оберт навколо сонця за еліптичною орбітою, де сонце розташоване в одному з фокусів. Площина цієї орбіти називається екліптикою. Час, необхідний для завершення повного оберту Землі навколо Сонця, відомий

як один рік. Взаємне положення Землі та Сонця зручно обговорювати через концепцію небесної сфери, центром якої є Земля. Небесний екватор утворюється внаслідок перетину небесної сфери площиною земного екватора, а полярна вісь проходить через небесні полюси. Рух нашої планети навколо Сонця проявляється на небі як видимий рух Сонця вздовж екліптики, яка нахилена під кутом  $23,45^\circ$  щодо небесного екватора. Кут між лінією, що з'єднує центри Сонця і Землі, та її проекцією на площину земного екватора називається кутом схилення Сонця ( $d$ ). Його значення дорівнює нулю в моменти весняного рівнодення (20/21 березня) і осіннього рівнодення (22/23 вересня).

Земля здійснює повний оберт навколо своєї полярної осі за одну добу. Щоденне обертання Землі сприймається як уявний рух небесної сфери навколо полярної осі. Позиція Сонця в конкретний момент визначається часовим кутом  $v$  – це кут між меридіаном, що проходить через Сонце, і меридіаном певної місцевості. У момент сонячного полудня цей кут дорівнює нулю, а згодом починає зростати в східному напрямку. Для спостерігачів на земній поверхні, які перебувають на певній географічній широті  $w$ , зручною орієнтацією слугує вертикальна лінія на місцевості. Ця лінія перетинає небесну сферу у двох точках: зеніті та надирі, і складає кут  $w$  з полярною віссю (див. рисунок 1.6). Велике коло, яке проходить перпендикулярно до вертикальної осі, називається горизонтом.

Широта ( $w$ ) точки або місцеположення – це кут, що утворюється між радіусом, який з'єднує обране місце з центром Землі, і його проекцією на площину екватора. Вісь обертання Землі перетинає її поверхню на широтах  $90^\circ$  (Північний полюс) і  $-90^\circ$  (Південний полюс). Будь-яка точка на земній поверхні може бути визначена як перетин кута широти та кута довготи.

Кут висоти Сонця ( $a$ ) являє собою вертикальний кут, що утворюється між напрямком сонячних променів і їх проекцією на горизонтальну площину у визначеній точці як зображено на рисунку 1.6. Іншим способом опису висоти

Сонця є використання сонячного зенітного кута ( $\theta_z$ ). Він представляє вертикальний кут між сонячними променями і прямою лінією, що перпендикулярна горизонтальній поверхні в точці спостереження ( $\theta_z = 90^\circ - \alpha$ ). Сонячний азимутальний кут ( $\gamma_s$ ) визначається як горизонтальний кут між напрямком на південь (у північній півкулі) і горизонтальною проекцією сонячного променя.

Проведено опитування для аналізу взаємозв'язку між різними параметрами та обчислення положення Сонця. Уолraven розробив алгоритм, який дозволив визначати сонячну позицію за допомогою мови програмування FORTRAN. У результаті було обчислено такі параметри, як час, довгота сонця, схилення, місцевий азимут, висота над горизонтом, а також момент сходу і заходу в реальному часі. Зазначено, що точність визначення положення Сонця склала 0,018.

#### **1.4 Випромінювання на похилих та відстежуючих поверхнях**

Дані про сонячне випромінювання зазвичай представлені у формі глобального випромінювання на горизонтальній поверхні. Однак, фотоелектричні панелі, як правило, встановлюються під нахилом до цієї площини. Тому для визначення енергії, що надходить до фотоелектричної системи, потрібно виконати відповідні обчислення. Процес такого розрахунку складається із трьох етапів. На початковому етапі здійснюється аналіз даних конкретної локації для розрахунку дифузних та прямих складових глобального випромінювання на горизонтальній поверхні. Це досягається за допомогою добового позаземного опромінення ( $B_0$ ), яке виступає як еталон, та обчислення коефіцієнта прозорості атмосфери  $K_T = G / B_0$ . Тут  $G$  відображає щоденне глобальне опромінення на горизонтальній поверхні (найчастіше у вигляді середньомісячного значення), а  $K_T$  характеризує середній рівень ослаблення сонячної радіації атмосферою для певного місця протягом обраного місяця.

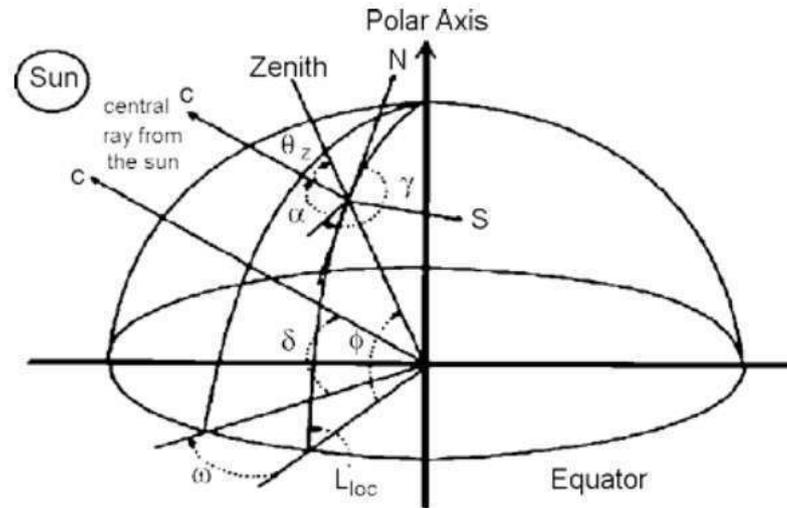


Рисунок 1.6 –Зображення сонячних кутів [16]

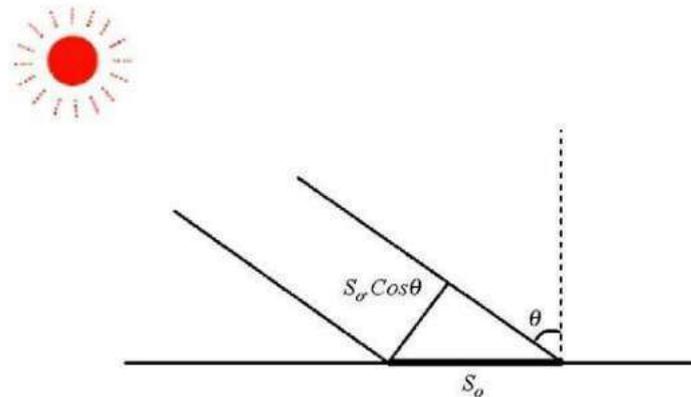


Рисунок 1.7 – Кут падіння сонячного випромінювання

На другому етапі дифузне опромінення визначають, спираючись на емпіричне правило, яке стверджує, що співвідношення дифузної частки  $D$  до глобального випромінювання  $G$  є універсальною функцією індексу прозорості атмосфери  $K_T$ . Тут  $D$  представляє собою середньомісячне середньодобове дифузне опромінення на горизонтальній площині ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ). Оскільки  $B$  обчислюється як різниця між  $G$  та  $D$  ( $B = G - D$ ), дана процедура дозволяє визначити як дифузне, так і променеве опромінення на горизонтальній площині, де  $B$  відповідає денному променевому опроміненню.

На третьому етапі відповідна кутова залежність кожного компонента використовується для визначення дифузного і променевого опромінення на похилій поверхні. З урахуванням відбивної здатності навколишнього області

також може бути визначено альбедо. Загальна добова опромінення на похилій поверхні потім виходить шляхом додавання трьох компонентів [16].

Сонце протягом дня рухається небосхилом, і це впливає на ефективність роботи сонячних колекторів. У випадку нерухомих колекторів площа їхньої проекції на площину, перпендикулярну напрямку сонячного випромінювання, визначається за допомогою функції косинуса кута падіння (див. рисунок 1.7).

Чим більший кут падіння променів  $\theta$ , тим менша потужність енергії, що надходить до панелі. Теоретичний аналіз отриманої енергії для слідкувальних колекторів базується на припущенні, що максимальна інтенсивність випромінювання  $I = 1000 \text{ Вт} \times \text{м}^2$  падає на область, орієнтовану перпендикулярно напрямку випромінювання. Якщо взяти тривалість дня  $t = 12 \text{ год} = 43\,200 \text{ с}$ , то потужність сонячної панелі, яка завжди оптимально налаштована до сонця, порівнюється з потужністю стаціонарної панелі, що орієнтована перпендикулярно напрямку випромінювання лише у полудень. Площа панелі позначена як  $S_0$ .

Для фіксованої панелі площа проекції в області, орієнтованої перпендикулярно напрямку випромінювання, дорівнює  $S = S_0 \times \cos\theta$ , де  $\theta$  змінюється в інтервалі  $(-\pi/2, +\pi/2)$  протягом дня. Кутова швидкість сонця, що рухається по небу, дорівнює

$$\omega = 2\pi / T \quad (1.1)$$

$$\omega = 7.27 \cdot 10^{-5} \text{ (рад / с)} \quad (1.2)$$

а диференціал поглинаючої енергії дорівнює:

$dW = I \cdot S \cdot dt$  Урахувавши впливом атмосфери, енергія на одиницю площі розраховується на весь день:

$$W = \int_{-21.6}^{+21.6} I \cdot S_0 \cdot \cos\omega t \, dt = I \cdot S \left[ \frac{\sin\omega t}{\omega} \right]_{-21.6}^{+21.6} = \frac{2 \cdot I \cdot S}{\omega} \quad (1.4)$$

$$W = 3.03 \times 10^7 \text{ (Вт}\cdot\text{с/м}^2 \text{ на добу)} = 8,41 \text{ (кВт}\cdot\text{год/м}^2 \text{ на добу)}. \quad (1.5)$$

Для відстежуючої панелі, нехтуючи впливом атмосфери, енергія на одиницю площі протягом усього дня:

$$W = I \cdot S_0 \cdot t \quad (1.6)$$

$$W = 4.75 \cdot 10^7 = 13.2 \text{ (кВт}\cdot\text{год / м}^2 \text{ в день)} \quad (1.7)$$

Наведені вище розрахунки свідчать, що система стеження забезпечує генерування на 57% більше енергії порівняно зі статичною установкою. Такий обсяг енергії, до прикладу, може бути отриманий на поверхні Місяця. На Землі сонячні промені мусять пройти через щільний шар атмосфери, що значно зменшує інсоляцію. З урахуванням впливу атмосфери, кількість сонячної енергії, яка досягає земної поверхні, виявляється меншою. У розрахунках також можна враховувати тривалість дня, що перевищує 12 годин. [16]

На рисунку 1.8 представлена залежність втрат енергії від максимального кута відстеження у порівнянні з оптимальним кутом. Як видно з малюнка, при кутах відстеження не менше  $\pm 60^\circ$  значного збільшення енергії не спостерігається.

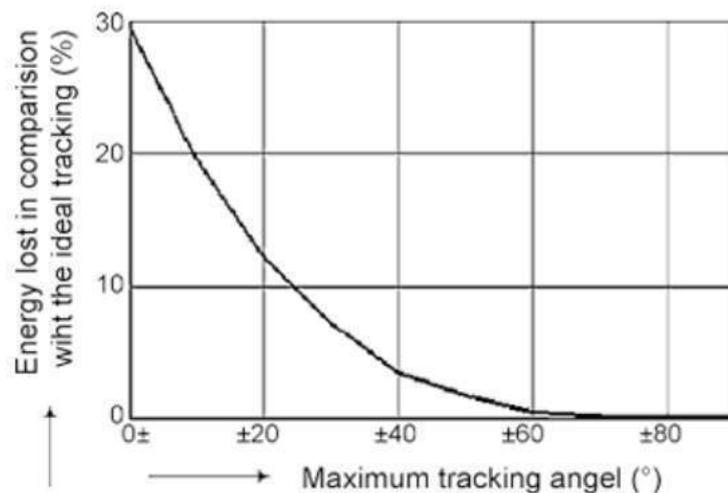


Рисунок 1.8 – Енергія втрачається в залежності від максимального кута

### 1.5 Методи відстеження сонця

Спостереження за сонцем можливо здійснити за допомогою одновісьових і, для кращої точності, двовісьових механізмів спостереження. Для двовісьової системи стеження за сонцем необхідні дві координати розташування: полярне (екваторіальне) стеження та азимутне (висота). Сонячний трекер — цей апарат, який зберігає фотоелектричні панелі у найвигіднішому становищі, — перпендикулярно сонячним променям упродовж дня, та збільшує обсяг поглиненої енергії. Перший трекер, представлений Й. Фінстером у 1962 році, був повністю механічним. Через рік Сааведра представила механізм з автоматичним електронним управлінням, який слугував для орієнтування піргеліометра Епплі. [5].

Трекери не мусять бути спрямовані прямо на сонце, аби бути ефективними. Якщо сонячна панель нахилена на  $10^\circ$ , вироблена потужність зберігається на рівні 98,5% від найбільшої при ідеальному розміщенні. У дуже похмурих та туманних місцях зростання за рік від трекерів може бути меншим за 20%. Загалом, річний приріст складає від 30 до 40%. Коефіцієнт підсилення у звичайний день може змінюватись від майже нуля до майже 100%. [5]

Т. Томсон розрахував ефективність двовісьового одного незалежного плоского концентратора. Порівняння результатів моделювання та експерименту показало, що використання простого спостереження з малим витрачанням енергії для невеликого щоденного руху збільшило вироблення енергії за сезон на 10-20% відносно колектора, встановленого під найкращим кутом. [9].

Гурт науковців під проводом Джона Аджи досліджував ринкові тренди та практичне впровадження технологій спостереження за Сонцем, пов'язані з цим витрати, потреби в обслуговуванні та зростання ефективності подібних установок. Їхнє дослідження охоплювало програмно керовані, сенсорно-базовані гідравлічні системи, як-от одноосьові, двохосьові, а також трекери з полярною віссю. Вони дійшли думки, що гідравлічна система стеження

підходить для малих потужностей. Вони з'ясували, що властивості системи відстеження полярних осей були схожими на властивості двохосьового типу, а її ціна дорівнювала ціні одноосьової системи стеження. [10]

Н. Хельва разом із колегами провела аналіз роботи стаціонарних та стежачих фотоелектричних установок для встановлення енерговитрат систем стеження і впливу точності роботи трекерів на загальну генерацію енергії. Дослідження порівнювало стаціонарну систему з кутом нахилу  $40^\circ$ , вертикально-осьовий трекер (управління на основі даних часу, дати та географічних координат) та двоосьовий трекер (керований мікропроцесором з командами ПК). У системах використовувалися різноманітні сенсори для вимірювання обертів і кінцеві вимикачі. Аналіз порівняльних графіків показав, що двоосьовий трекер збільшує річну генерацію енергії на 30%, а вертикально-осьовий — на 18%. [8].

Водночас споживання енергії мікропроцесорами, сенсорами та приводами становило 50 Вт·год/добу для двоосьового трекера та 22 Вт·год/добу для вертикального, при похибці відстеження  $\pm 0,56^\circ$  і  $\pm 10^\circ$  відповідно. Хоча наявність сонячного трекера не є обов'язковою для функціонування сонячних батарей, його використання дає змогу значно підвищити загальну продуктивність установки. Проте, під час встановлення таких пристроїв важливо враховувати фактори вартості, надійності, власного енергоспоживання, потреби в технічному обслуговуванні та впливу на ефективність системи.

Системи моніторингу сонця мають усі або деякі з наступних

Властивостей:

- один або два приводні механізми;
- світлочутливий прилад;
- незалежне або додаткове живлення;
- дотримання та пересування відповідно до розкладу;
- безперервний або поетапний хід;

- моніторинг цілорічний або сезонний моніторинг.

Розглянули кілька методів спостереження за сонцем, які дають змогу тримати сонячні панелі перпендикулярно сонячним променям. Взірцевий трекер дозволив би фотоелементам точно націлюватися на Сонце, враховуючи обидві зміни: азимутальне зсунення Сонця (протягом доби), широтне зсунення Сонця (під час сезонних змін). Системи спостереження за Сонцем зазвичай поділяють на два класи: пасивні (механічні) та активні (електричні) трекари.

Отже, у розділі описана актуальність теми. Вказуючи на стрімке зростання ринку сонячної енергетики та аналізуючи технічні основи фотоелектричних систем, включно з класифікацією панелей за їхнім ККД. Центральною проблемою, яку висвітлює аналіз, є неефективність статично встановлених СЕС. Доведено, що їхня продуктивність критично знижується через постійну зміну кута падіння сонячних променів протягом дня, через що значна частина потенційної генерації втрачається.

Як вирішення цієї проблеми детально представлені трекінгові системи – електромеханічні пристрої, що автоматично орієнтують панелі, утримуючи їх перпендикулярно до сонячних променів. Обґрунтовано, що такий підхід забезпечує значний приріст ефективності: теоретичні розрахунки показують збільшення виробітку енергії на 57%, тоді як реальний річний приріст становить 30-40%.[14].

## **2 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ**

### **2.1 Обґрунтування вибору трекінгової системи**

Для зменшення спаду ефективності роботи сонячних панелей, їх варто встановлювати на поворотних модулях, які дозволять протягом усього світлового дня орієнтувати батареї на сонце. Такий поворотний механізм, на якому закріплена опорна конструкція з однією або кількома сонячними панелями називається трекером.

Сонячний трекер є електронно-механічною системою, створеною для наведення сонячних панелей на сонце. Система відстежує позицію сонця на небосхилі та подає команду сервоприводу, який обертає панелі у потрібному векторі. Використання подібного трекера дає змогу отримати найбільшу віддачу від сонячних батарей.

Переважаюча більшість таких установок реалізуються за допомогою апаратної обчислювальної платформи Arduino. Для визначення позиції сонця використовуються фотосенсори. Залежно від рівня освітлення й взаємного розміщення фотосенсорів, відбувається обертання у напрямку максимального світла.

У такого методу є недоліки:

- незрозуміло, як діятиме система у похмуру погоду;
- слабка завадостійкість у плані реагування на місячне світло та яскраві джерела світла, а також на окремі хмари.

### **2.2 Загальна характеристика електромеханічної системи сонячного трекера**

Навіть найпростіший обертовий пристрій із системою слідкування за сонцем дозволяє здобути максимальний коефіцієнт корисної дії від фотомодулів. Як засвідчили дослідження, при відсутності належного

орієнтування сонячних панелей на сонці втрачається до 35% потужності. Тому, щоб вийти на заплановану потужність у разі нерухомого кріплення фотоелементів, доводиться монтувати більшу кількість панелей.

### **2.2.1 Принцип побудови систем управління поворотом сонячних батарей**

Є кілька різновидів систем керування поворотом сонячних панелей. Ці прилади доволі коштовні, що здатні регулювати позицію одразу багатьох панелей.

Зазвичай така система керування містить сонячний сенсор, мікроконтролер, сам двигун і, власне, раму, на якій закріплюється сонячна панель. Обертальний механізм для сонячного енергомодуля належить до систем автоматичного стеження за джерелом світла і створений для автоматичного спрямування площини панелі за джерелом світла (сонцем) задля її найбільшої освітленості.

Обертальний пристрій, призначений для обертання панелей відповідно до місця розташування небесного «світила». Такий прилад дає змогу здобути найбільшу можливу кількість прямих променів протягом усього дня. Конструкція цього механізму виготовляється зі сталевих чи алюмінієвих профілів та трубок. У хід апарат приводиться за допомогою електродвигуна та редуктора. А от для відслідковування руху сонця використовується блок керування.

На ринку представлені різні комплектації обертових установок для сонячних панелей. Ви можете вибрати тип електродвигуна та редуктора, а також знайти зразок, що відповідатиме Вашим потребам за своїми характеристиками.

Існує поділ і за кількістю осей руху:

- одноосьовий поворотний механізм;
- двохосьовий поворотний механізм.

Існує декілька різновидів апаратних комплексів керування обертанням сонячних панелей. Ці прилади досить дорогі за рахунок того, що можуть коригувати позицію одразу багатьох панелей.

Зазвичай подібна система опрацювання містить сонячний сенсор, мікроконтролер, сам двигун та каркас на якому встановлюється сонячна панель. Обертальний механізм для сонячного енергомодуля належить до апаратних комплексів автоматичного відслідковування джерела світла і створений для автоматичного наведення площини панелі за джерелом світла задля її найбільшої освітленості.

Поворотний пристрій, призначений для обертання панелей відповідно до розташування сонця. Такий апарат дає змогу отримати найбільшу можливу кількість прямих променів протягом усього дня. Механізм цієї конфігурації виготовляється зі сталевих чи алюмінієвих профілів і трубок. Для приведення в рух конструкції використовується електродвигун та редуктор. А от для відстеження руху сонця застосовується блок керування.

На ринку представлені різні комплектації поворотних пристроїв для сонячних панелей.

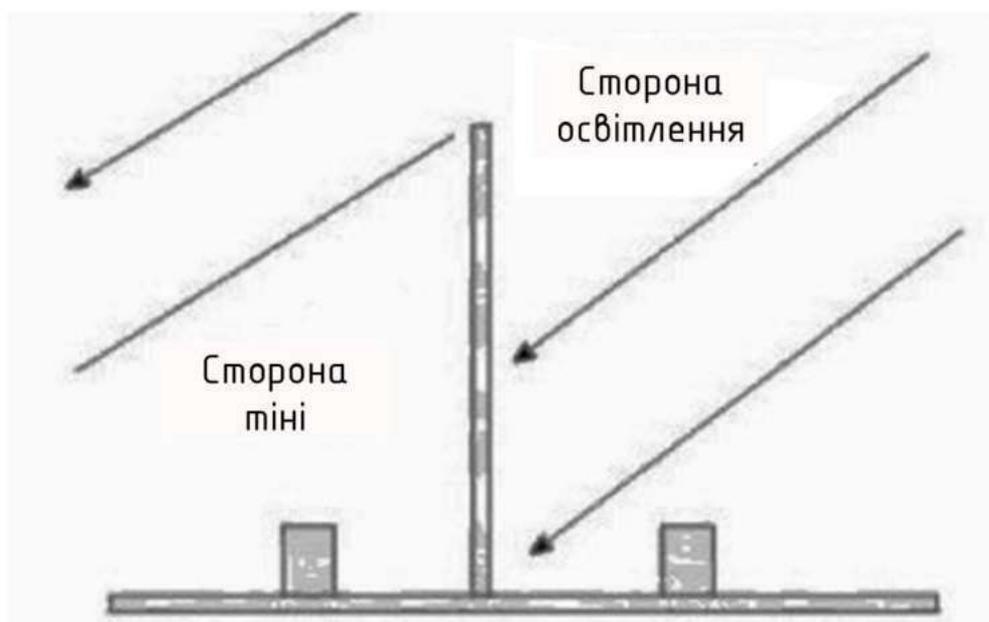


Рисунок 2.1 – Схема датчика положення сонця

### 2.2.2 Система управління поворотом сонячних панелей на базі годинникового механізму

Промислові електромеханічні системи керування сонячним фотоелектричними станціями з двовісними поворотними модулями – дуже затратні. Прагнення усіх власників сонячних електростанцій – збільшити вихідну потужність, але водночас зменшити витрати. Як наслідок зросло виробництво саморобних приладів, оригінальних за своїм задумом. Такі прилади цілком успішно контролюють орієнтацію панелей відносно сонця [20].

Один із варіантів такого приладу – система керування орієнтацією панелей, збудована на основі годинникового механізму. Для слідкування за сонцем зовсім не потрібно застосовувати світлоприймальний гаджет. Для цього досить узяти звичайний настінний механічний годинник. Відомо, що за одну годину сонце долає по небосхилу зі сходу на захід шлях, який відповідає кутовій зміні на  $15^\circ$ . Оскільки для сонячної панелі такий кутовий зсув не надто важливий, то достатньо вмикати поворотний механізм раз на годину. (рисунок 2.2).

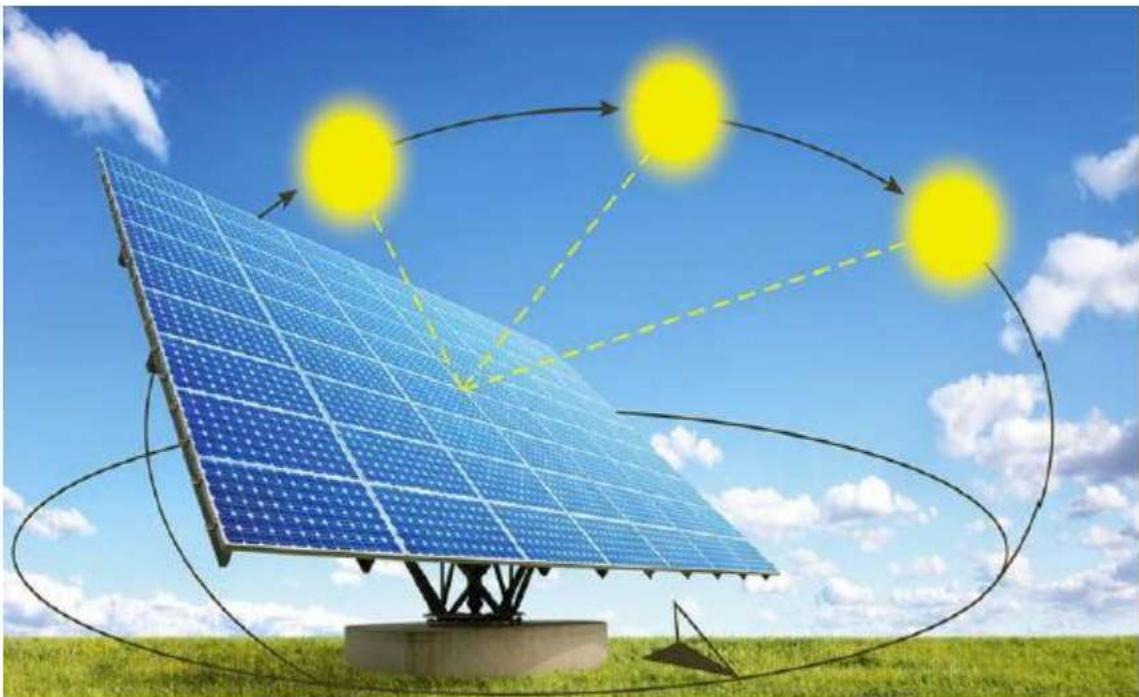


Рисунок 2.2 – Стеження за переміщенням сонця по годинах

Пристрій для повороту сонячної панелі навколо вертикальної осі може виглядати отак. На циферблаті на віддалі довжини хвилинної стрілки від центру, у позиції, що відповідає 12-й годині, закріплюється нерухомий контакт. Рухомий контакт – на кінчику хвилинної стрілки. Таким чином, кожні 60 хвилин відбуватиметься з'єднання контактів та увімкнення двигуна, який обертає сонячну панель. Вимкнення двигуна можна влаштувати по-різному, наприклад, кінцевим вимикачем або реле часу. Якщо на циферблаті встановити ще один нерухомий контакт у позиції, що відповідає 6-й годині, то коригування позиції панелі відбуватиметься кожні півгодини. У такому випадку механізми вимикання двигуна мусять бути відкалібровані на обертання опорної платформи на кут  $7,5^\circ$ . Окрім того, за бажанням, тут же, на цьому механізмі, за допомогою іншої контактної групи, але вже на базі годинникової стрілки, можна скомпонувати схему автоматичного повернення сонячної панелі у вихідну позицію. На базі цієї ж годинникової стрілки можна зібрати апаратуру керування поворотом панелі і навколо горизонтальної осі. Допоки годинникова стрілка рухається до 12-ї години, опорна рама підіймається слідом за сонцем. Після 12-ї години двигун горизонтальної осі реверсує, і сонячна панель починає обертатися у зворотний бік.

## **2.2 Вибір апаратної частини трекінгової системи**

На сьогодні можна узагальнено виділити два типи трекерних систем, що відрізняються за типом приводного механізму:

- пасивні трекери;
- активні трекери.

Назва пасивних трекерів зумовлена принципом їхньої роботи. Для переміщення опорної рами з сонячними панелями такий трекер не потребує специфічного підведення енергії, а функціонує завдяки природним процесам зміни інтенсивності сонячного випромінювання. Отже, фактичне електроспоживання трекера дорівнює нулю.

Активні трекерні системи, на відміну від пасивних, потребують живлення електричною енергією для руху опорного майданчика. Тому саме така система вимагає досконалого методу керування.

Для більш точного розуміння на експериментальному макеті системи, що працює за принципом керування за допомогою фотоелектричних сенсорів та гібридної системи. Макет буде зменшеною копією наявної системи керування сонячної електростанції, до якої буде застосовано оптимальний метод керування та обчислення всіх вихідних параметрів та витрат енергії на пересування опорного майданчика порівняно зі стаціонарною сонячною електростанцією.

Розглянемо принцип роботи системи з керуванням за допомогою фотоелектричних сенсорів. Робота такої системи ґрунтується на принципі зіставлення показників фотоелектричних сенсорів за допомогою мікроконтролера, який, у свою чергу, генерує сигнал, що надсилається до виконавчих пристроїв. Виконавчими пристроями в трекерній системі є електродвигуни, з'єднані з редукторами. Принцип роботи системи стеження, заснований на зіставленні показників фотоелектричних сенсорів зображено на рисунку 2.3.

Для правильної роботи системи, принцип дії якої базується на зіставленні показників фотоелектричних сенсорів, потрібно гарантувати дві головні умови: правильне монтування фотоприймачів і належний програмний код для мікроконтролера. Виконання другої умови значною мірою залежить від застосованого в певній інсталяції виду мікроконтролера. Для різних типів мікроконтролерів потрібен код на різних мовах програмування, наприклад, C, C++, C#, Basic, Асемблер. Незалежно від мови програмування, до коду програми ставиться наступна вимога: алгоритм програми повинен гарантувати високу точність зчитування відомостей та визначення позиції, при цьому він повинен відкидати коливання, спричинені похибкою вимірювання або перешкодами у прийнятому сигналі.



Рисунок 2.3 – Принцип роботи системи стеження, заснований на порівнянні показників фотоелектричних датчиків

Функція програми мікроконтролера полягає в тому, щоб подавати керуючі сигнали на виконавчі пристрої при виконанні одних умов (різниця показників фотоелектричних сенсорів) і вимикати керуючий сигнал у момент дотримання іншої умови (різниця показників відсутня). Правильне монтування фотоприймачів має забезпечити потрібну різницю показників однієї або двох пар фотоелектричних датчиків. Існує три основні методи встановлення фотоелектричних сенсорів. Схема встановлення зображена на рисунку 2.4.

Перший метод монтажу припускає розміщення двох сенсорів на одній площині, паралельній площині стеження. Точно по центру між двома

сенсорами розміщується затінювальний елемент. Цей затінювальний елемент обмежує ступінь освітленості одного з сенсорів, за умови, що весь прилад повернутий відносно сонячних променів на певний кут. При цьому, різниця ступеня освітленості фотосенсорів буде прямо пропорційна куту між площиною та сонячними променями. У ситуації, коли майданчик стеження повернений до Сонця під кутом у  $90^\circ$ , ступінь освітленості фотоелектричних сенсорів по обидві сторони від затінювального елемента буде однаковий. Ця умова відповідає моменту вимкнення керуючого сигналу з виконавчих механізмів.

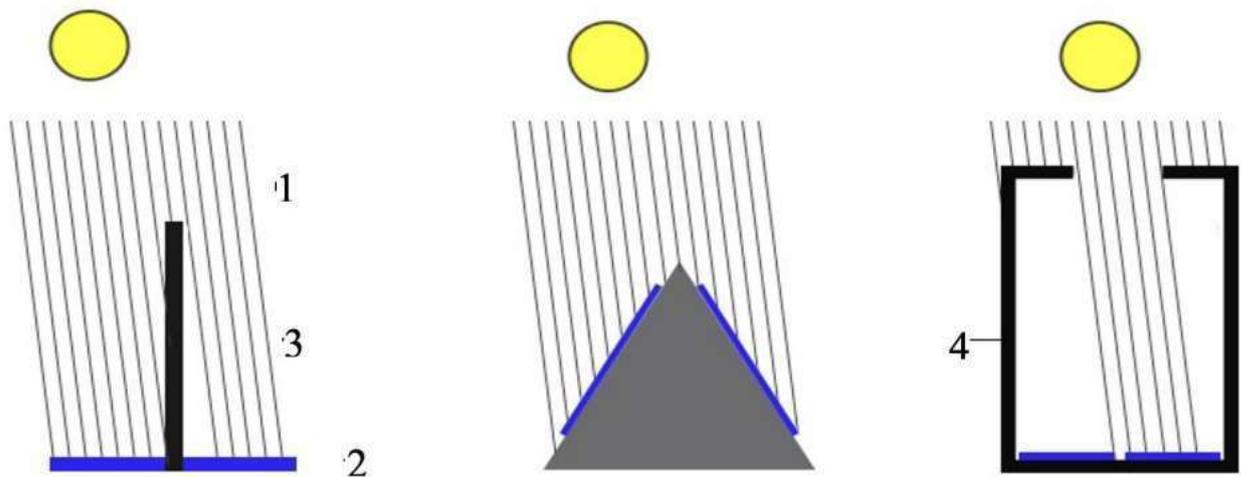


Рисунок 2.4 – Схема установки фотоелектричних датчиків

На рисунку 2.4: 1 – сонячні промені; 2 – фотоелектричні датчики; 3 – затінюючий пристрій; 4 – коліматорна трубка.

Другий метод монтажу припускає розміщення фотоелектричних сенсорів на двох гранях трикутної призми, або на чотирьох гранях піраміди з квадратом в основі. При такому розташуванні різниця ступеня освітленості забезпечується самим розміщенням сенсорів.

Третій метод монтажу забезпечує найбільшу точність показників сенсорів. Проте, потребує високоточних сенсорів та наявності коліматорної трубки. Коліматорна трубка – цей пристрій, який має в центрі вузький отвір,

який обмежує потрапляння на сенсори відбитих та заломлених сонячних променів і пропускає лише прямі сонячні промені. Такий спосіб знаходження положення сонця застосовується досить рідко, оскільки пристрій з таким принципом має значно вищу вартість відносно інших варіантів.

Перевагою установок, що використовують для наведення на сонце за принципом зіставлення показників фотоелектричних сенсорів, є відносна простота послідовності дій. Загальний недолік таких установок виявляється у похмурі дні. У разі, коли хмара закриває трекерну установку з фотоелектричними сенсорами, останні фіксують близькі значення освітлення з обох сторін затінюючого елемента, або граней піраміди. Це зумовлене тим, що водяна пара у хмарі порівняно рівномірно розсіює сонячне світло, забезпечуючи майже однакове освітлення усіх фотосенсорів з уявним джерелом світла, яке розташоване перпендикулярно до поверхні землі. Внаслідок такого явища, мікроконтролер подає такі керуючі сигнали, що відстежуюча платформа орієнтується паралельно поверхні землі. Після припинення часу затінення хмарою, система починає виконувати рухи у пошуках нової позиції сонця. Схожа поведінка системи спричиняє посилені витрати енергії на обертання конструкції під час хмарності і після завершення цього часу під час пошуку нової позиції. При цьому збільшення генерації сонячними панелями електроенергії не фіксується.

Активні трекерні системи мають недолік перед пасивними в тому, що для їх функціонування необхідне постійне електричне живлення. Однак, активні відстежуючі прилади мають низку переваг:

- висока точність позиціонування;
- велика рухомість системи;
- гнучкість в управлінні.

### 2.3 Склад компонентів макету та їх підключення

Розглянувши наявні методи керування та визначившись із потрібним для оптимізації способом, виберемо та обґрунтуємо підбір необхідних елементів для макету.

Для початку слід обрати контролер управління, а саме той потрібний для втілення нашого методу відстеження мікроконтролер, алгоритм програми якого має гарантувати високу точність зчитування відомостей і розміщення, при цьому він мусить фільтрувати коливання, спричинені похибкою вимірювання чи завадами у сигналі, що надходить [3].. На розгляд було 4 варіанти плати керування, а саме Arduino Nano, Arduino Mega, Arduino UNO та Arduino DUE. Для втілення нашого методу було вибрано Arduino UNO. Плату керування Arduino UNO наведено на рисунку 2.5.

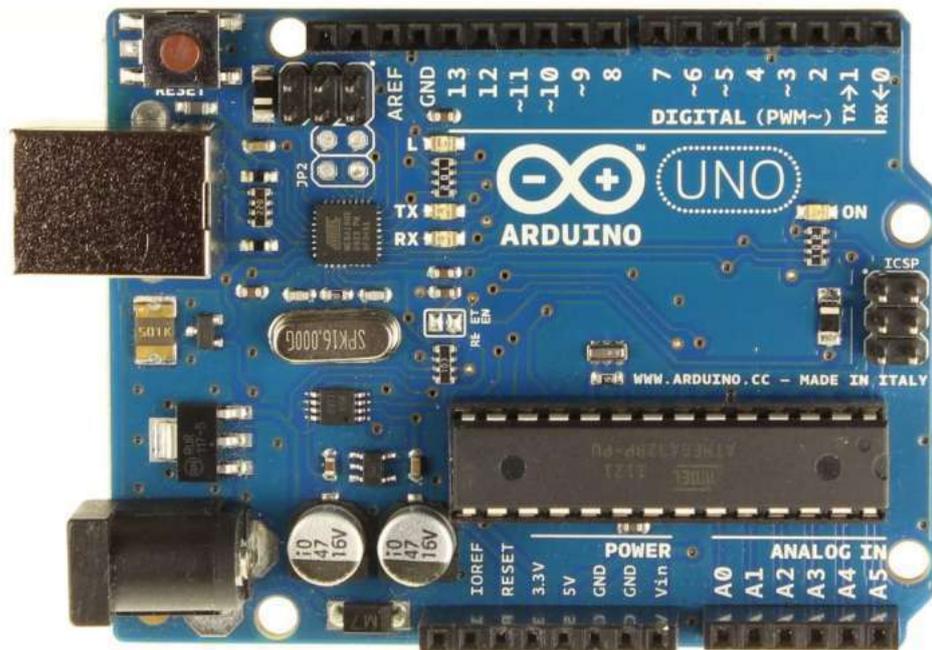


Рисунок 2.5 – Плата керування Arduino UNO

Після того, як ми визначилися з нашим мікроконтролером, треба вибрати інші складові системи для впровадження нашого сонячного трекера.

Для обертання платформи у горизонтальній та вертикальній площинах застосовуються електромеханічні приводи (рисунок 2.6), кут обертання яких залежить від потужності світла, що потрапляє на фоторезистори.



Рисунок 2.6 – Приводи SL95 Solar та Hanning HFG-L Solar

Ці електромеханічні приводи застосовуються у побутових тренувальних системах. Для стеження за сонячним промінням використаємо чотири фоторезистори LDS 20-30K.

Вибравши усі потрібні складові, необхідно створити електричні схеми. Макетна схема з'єднання логіки елементів зображена на рисунку. 2.7. Принципова схема підключення логіки елементів наведено на рисунку 2.8

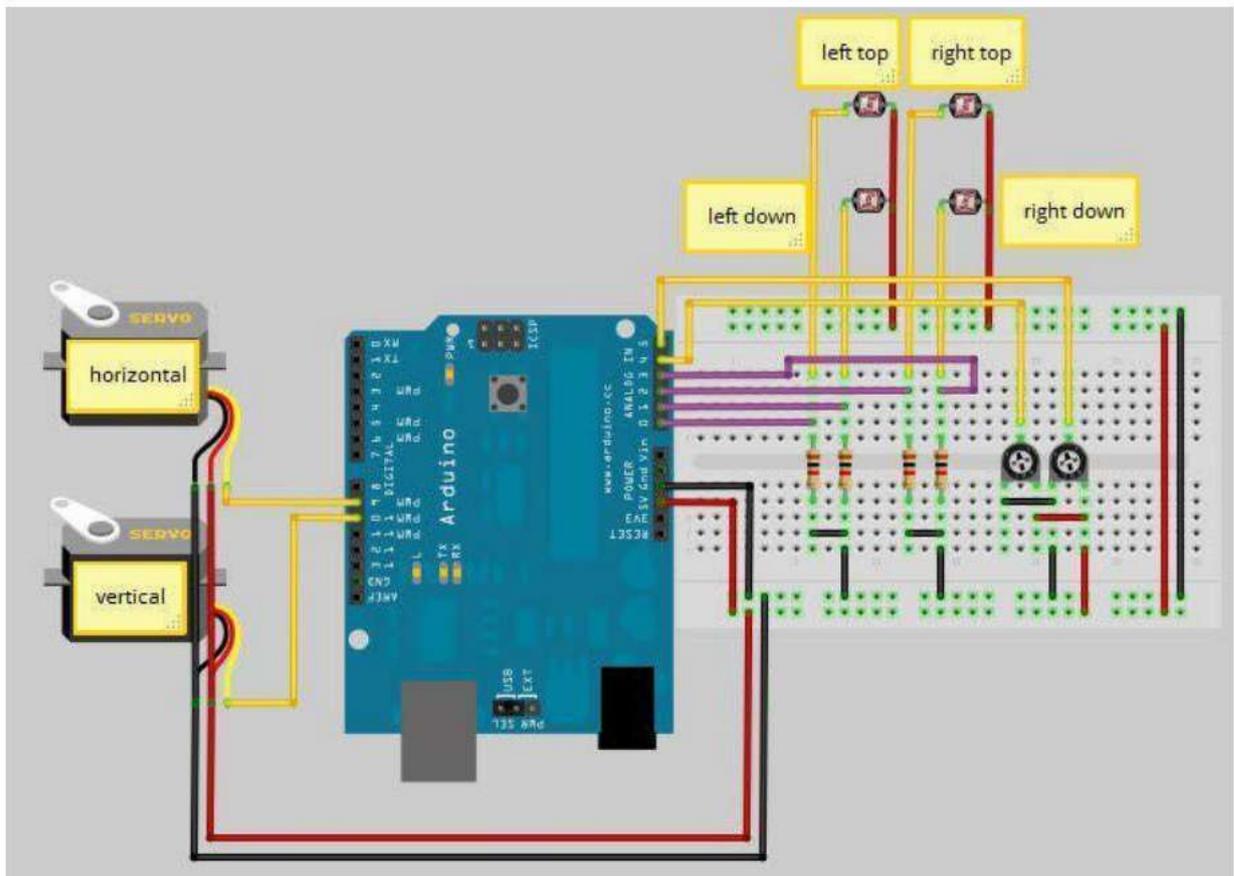


Рисунок 2.5 – Макетна схема підключення компонентів

Отож, розробивши схеми з'єднання складових системи керування, потрібно підключити до них живлення. Для цього ми обрали понижувальний модуль Amigo AMS-47-0501000FV DC-DC для постійного струму [3]..

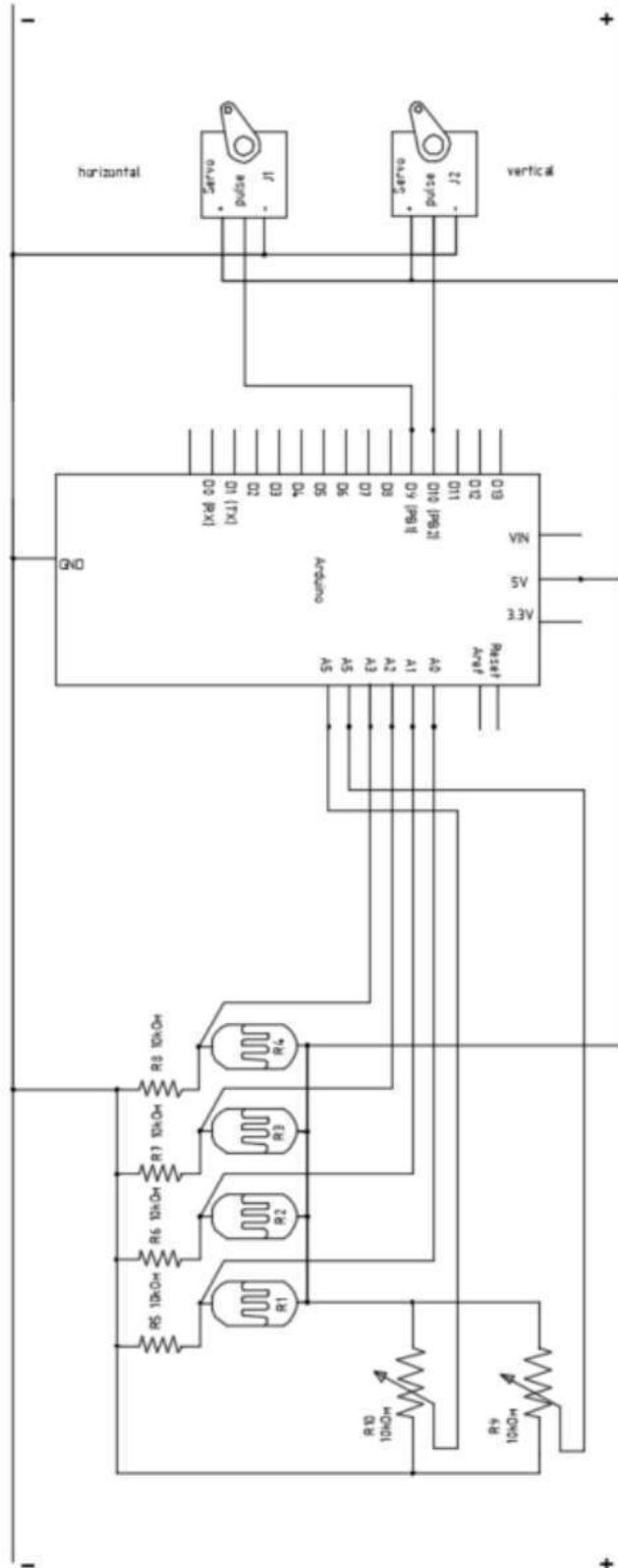


Рисунок 2.5 – Принципова схема підключення логіки елементів

## 2.4 Розробка алгоритму та програми трекера

Після того, як схема була цілком зібрана, можна розпочати розробку демонстраційної програми. Розробка ведеться у середовищі Arduino IDE, яка створена спеціально для створення програм для платформи Arduino.

Спочатку потрібно налаштувати сонячні панелі та їх положення відносно сонця.

```
#include <Servo.h> // include Servo library
Servo horizontal; // horizontal servo
int servoh = 90; // stand horizontal servo
Servo vertical; // vertical servo
int servov = 90; // stand vertical servo
```

Далі необхідно налаштувати 4 фоторезистора для подальшого використання.

```
// LDR pin connections
// name = analogpin;
int ldrlt = 0; //LDR top left
int ldrrt = 1; //LDR top right
int ldrlb = 2; //LDR down left
int ldrrb = 3; //ldr down right
```

Після того як налаштовано параметри системи – потрібно обрати найкращий спосіб пошуку сонця. Щоб знайти середину лінії, ми додаємо числа вгорі ліворуч і внизу ліворуч, а потім ділимо результат на два. Це те саме, що зробити для чисел у верхньому правому і нижньому кутах праворуч. Якщо ліві і праві сторони модуля відрізняються більше, ніж на максимум, ми рухаємося до вищого та нижчого значення. Якщо верхні частини модуля відрізняються на більше, ніж максимальні, ми переходимо до більшого значення. [3].

```
int avt = (lt + rt) / 2; // average value top
int avd = (ld + rd) / 2; // average value down
```

```

int avl = (lt + ld) / 2; // average value left

int avr = (rt + rd) / 2; // average value right

int dvert = avt - avd; // check the diffirence of up and down

int dhoriz = avl - avr; // check the diffirence og left and rigt

if (-1 * tol > dvert || dvert > tol) // check if the diffirence is in the tolerance else change vertical angle
{
    if (avt > avd) {
        servov = ++servov;

        if (servov > 180) {
            servov = 180;
        }
    } else if (avt < avd) {
        servov = --servov;

        if (servov < 0) {
            servov = 0;
        }
    }
    vertical.write(servov);
}

if (-1 * tol > dhoriz || dhoriz > tol) // check if the diffirence is in the tolerance else change horizontal angle
{
    if (avl > avr) {
        servoh = --servoh;

        if (servoh < 0) {
            servoh = 0;
        }
    } else if (avl < avr) {

```

```

servoh = ++servoh;

if (servoh > 180) {
    servoh = 180;
}

} else if (avl == avr) {
    // nothing
}

horizontal.write(servoh);
}

delay(dtime);
}

```

## 2.4 Проведення експериментів та результати дослідження

Було з'ясовано, що найбільш гнучкими та дієвими є активні й гібридні системи керування. Саме вони потребують оптимального способу управління.

Оцінити дієвість системи стеження за сонцем можна завдяки порівнянню обсягу вихідної енергії, за допомогою відстежуючої системи, у співставленні зі стаціонарною станцією та обсягу енергії, затраченої на орієнтацію відстежуючого майданчика. Для такого співставлення спочатку необхідно визначити кількість енергії, яка буде отримана із стаціонарної фотоелектричної станції певної площі, а потім визначити кількість енергії, яка генерується такою станцією, але з пристроєм стеження.

Щоб визначити отриману та витрачену енергію станції з трекером, потрібно задати параметри самого трекера.

Потрібні параметри:

- площа сонячних панелей, що вміщуються на відстежуючому майданчику трекера;
- потужність двигуна, який повертає відстежуючий майданчик;

- потужність двигуна, який нахиляє відстежуючий майданчик;
- можлива точність розміщення.

Окрім того, треба обрати сонячні панелі, які застосовуватимуться в системі. Також варто обрати координати, для яких буде здійснено розрахунок системи.

Тому що для впровадження оптимального методу керування та обчислення всіх даних потрібна повноцінна електростанція. За основу дослідження буде взято активну трекерну систему, яка подібна за способом керування нашому макету трекерної системи. Для цього обрано систему Hanning, яка складається з двох компонентів: поворотного механізму HFG - L Solar та механізму нахилу SL95 Solar. Зображення даної системи наведено на рисунку 2.6.



Рисунок 2.6 – Сонячний двовісний трекер

Система Hanning – це механізм, призначений для автоматичного відстеження положення сонця протягом дня та року. Використання двох рухомих елементів дозволяє максимально збільшити генерацію електроенергії (до +25-40% порівняно зі стаціонарними системами).

Основні елементи системи Hanning.

Названі компоненти HFG-L Solar (360 Вт) та SL95 Solar (450 Вт) у цьому контексті є не сонячними панелями, а електромеханічними приводами (моторами/актуаторами), які забезпечують рух трекера:

Поворотний механізм (HFG-L Solar):

- Забезпечує обертання (рух по азимуту) усієї платформи з панелями навколо вертикальної осі. Це дозволяє стежити за сонцем зі сходу на захід.

- 360 Вт – це максимальна потужність споживання (електрична потужність) електродвигуна, який приводить у рух цей механізм.

Механізм нахилу (SL95 Solar):

- Забезпечує зміну кута нахилу (рух по елевації) панелей. Це дозволяє коригувати положення панелей відповідно до висоти сонця над горизонтом, яка змінюється впродовж року.

- 450 Вт – це максимальна потужність споживання (електрична потужність) електродвигуна, що відповідає за нахил.

Технічні характеристики системи:

- Двовісний трекер: система може рухатися у двох площинах, що робить її високоефективною.

- Максимальна площа 60 м<sup>2</sup>: Це фізичне обмеження розміру масиву сонячних панелей, який може бути встановлений на цьому конкретному трекері. Як ми розраховували раніше, це приблизно 30-31 панель.

- Точність позиціонування 0.3% Це дуже високий показник, який гарантує, що кут між площиною панелі та сонячними променями буде мінімальним, забезпечуючи максимальну генерацію.

- Споживана потужність: сумарна пікова потужність, необхідна для одночасного руху обох механізмів, становить 360 Вт + 450 Вт = 810 Вт.

Сонячні панелі для розрахунку виберемо Trina Solar TSM-NEG21C.20 710W. Параметри вибраної панелі приведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри сонячної панелі Trina Solar TSM-NEG21C.20 710W

Тип кристалу	Монокристал, 210 x 210 мм
Максимальна потужність	710 Вт
Напруга при максимальній потужності	40.90 В
Струм при максимальній потужності	17.36 А
Напруга холостого ходу	49.00 В
Струм короткого замикання	18.40 А
ККД	22.9%
Робоча температура	-40°C – +85°C
Габаритні розміри	2384 x 1303 x 33 мм

Розрахунок проведемо для координат 48°69' північних широти, 29°02' східної довготи (Україна, Вінницька область).

Спочатку розрахуємо, яку кількість енергії виробить за рік стаціонарна сонячна електростанція. Визначимо обсяг сонячної енергії, що приходить на похилу поверхню фотоелектричних панелей за один рік. Найкращим кутом нахилу для обраної місцевості, з урахуванням орієнтації роботи системи цілий рік, є кут, рівний 35°.

Кількість сонячної енергії, що виробляється за рік фотоелектричною станцією визначається по наступній формулі:

$$E_{\text{год}} = \sum_{i=1}^{365} W_i \cdot S \cdot n_{\text{inv}} \quad (2.1)$$

де  $W_i$  – енергія, вироблена з 1м<sup>2</sup> поверхні під нахилом за один день;

$S$  – загальна ефективна площа сонячної станції.

Загальна ефективна площа сонячної станції визначається таким чином:

$$S_c = N_m \cdot N_c \cdot S_c \quad (2.2)$$

де  $N_m$  – кількість сонячних модулів в станції;

$N_c$  – кількість фотоелектричних кристалів на одному модулі, для вибраної моделі панелей рівняється 144;

$S_c$  – площа одного фотоелектричного кристала

$$S_c = 210 \cdot 210 = 0,0441 \text{ (м}^2\text{)} \quad (2.3)$$

Визначимо кількість сонячних панелей на станції. Максимально можлива площа для установки трекерної системи дорівнює  $60 \text{ м}^2$ . Знайдемо площу однієї сонячної панелі:

$$S_n = 2,384 \cdot 1,303 = 3,1 \text{ (м}^2\text{)} \quad (2.4)$$

Тоді, кількість сонячних модулів в станції:

$$N_m = 60 / 3,1 = 19,3 \approx 18 \text{ (модулів)} \quad (2.5)$$

Знайдемо загальну ефективну площу сонячної електростанції:

$$S = 18 \cdot 60 \cdot 0,0441 = 47,628 \text{ (м}^2\text{)} \quad (2.6)$$

Енергія, вироблена за 1 день з  $1 \text{ м}^2$  похилої поверхні, визначається по формулі:

$$W_i = E_i \cdot \eta_m \quad (2.7)$$

де  $E_i$  – сонячна енергія, що падає на  $1 \text{ м}^2$  похилої поверхні за один день;

$\eta_m$  – ККД сонячної панелі

Сонячна інсоляція на  $1 \text{ м}^2$  похилій поверхні визначається по формулі:

$$E_i = \frac{E_{\text{гор}}}{\sin \alpha_i} \cdot \sin(\alpha_i + \beta) \quad (2.8)$$

де  $E_{\text{гор}}$  – сонячна енергія, що отримується за добу на  $1 \text{ м}^2$  горизонтальної поверхні;

$\alpha_i$  – кут висоти сонця;

$\beta$  – кут нахилу сонячної панелі.

База даних із відомостями про середньодобову інсоляцію для кожного дня в році сформовано на основі даних, здобутих з сайту NASA Surface meteorology and Solar Energy (SSE), шляхом усереднення за 30 років. Таблиця довідкових даних, на яких провадиться обчислення, подана у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Фрагмент бази даних середньодобової інсоляції за кожен день в році

Номер дня в місяці	Місяць	Середньодобова (кВт·год/м <sup>2</sup> )
1	Січень	0,9
2	Лютий	1,5
3	Березень	2,5
4	Квітень	3,8
5	Травень	5,07
6	Червень	5,2
7	Липень	5,1
8	Серпень	4,4
9	Вересень	3,2
10	Жовтень	2,0
11	Листопад	1,0
12	Грудень	0,8

Результати розрахунку сонячної енергії, що падає на 1 м<sup>2</sup> похилої поверхні під кутом 35° наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Фрагмент таблиці з результатами розрахунку сонячної енергії що попадає на 1 м<sup>2</sup> похилої поверхні

Номер дня в місяці	Місяць	Інсоляція, (Вт·год/м <sup>2</sup> )
1	травень	4,88

Продовження таблиці 2.3

2	травень	4,90
3	травень	4,91
4	травень	4,93
5	травень	4,94
6	травень	4,95
7	травень	4,97
8	травень	4,98
9	травень	5,00
10	травень	5,01
11	травень	5,02
12	травень	5,04
13	травень	5,05
14	травень	5,06
15	травень	5,08
16	травень	5,09
17	травень	5,06
18	травень	5,08
19	травень	5,09
20	травень	5,11
21	травень	5,12
22	травень	5,14
23	травень	5,15
24	травень	5,17
25	травень	5,18
26	травень	5,20
27	травень	5,21
28	травень	5,23
29	травень	5,24
30	травень	5,25
31	травень	5,27

Визначимо, кількість електричної енергії, що виробляється 1 м<sup>2</sup> сонячної панелі за кожен день. Для прикладу, розрахуємо значення для першого травня:

$$W_i = 4,88 \cdot 0,229 = 1,117 \text{ (кВт} \cdot \text{год)} \quad (2.9)$$

В таблиці 2.4 наведений фрагмент даних про енергію, яка виробляється з 1 м<sup>2</sup> похилої поверхні з урахуванням ККД сонячних панелей.

Таблиця 2.4 – Фрагмент даних про щоденне вироблення електроенергії з 1 м<sup>2</sup> похилої поверхні

Номер дня в місяці	місяць	Електроенергія, кВт*г
1	травень	1,117
2	травень	1,122
3	травень	1,124
4	травень	1,129
5	травень	1,131
6	травень	1,134
7	травень	1,138
8	травень	1,140
9	травень	1,145
10	травень	1,147
11	травень	1,149
12	травень	1,154
13	травень	1,156
14	травень	1,158
15	травень	1,163
16	травень	1,165
17	травень	1,158
18	травень	1,163
19	травень	1,165
20	травень	1,170
21	травень	1,172
22	травень	1,177
23	травень	1,179
24	травень	1,184
25	травень	1,186
26	травень	1,191
27	травень	1,193
28	травень	1,198
29	травень	1,2
30	травень	1,203
31	травень	1,207

Розуміючи обсяг енергії, що генерується, з 1 м<sup>2</sup> похилої площі та загальну корисну площу станції, визначимо кількість енергії, що виробляється з усієї фотоелектричної установки:

$$E_i = W_i \cdot S \quad (2.10)$$

Наприклад, для першого травня:

$$E_d = 1,117 \cdot 47,628 = 53,2 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (2.11)$$

Для точнішої оцінки кількості енергії, що виробляється фотоелектричною станцією необхідно врахувати можливі втрати в провіднику. Прийmemo їх рівними 1%. Також необхідно врахувати ККД інвертора, який дозволить перетворити рід струму з постійного в змінний, для подальшого підключення до мережі.

Виберемо інвертор марки Huawei SUN2000-100KTL-M2. Його основні технічні параметри приведені в таблицю. 2.5.

Таблиця 2.5 – Основні технічні параметри інвертора SUN2000-100KTL-M2

Номінальна потужність	100кВт
Максимальна напруга на вході	1100В
Максимальний струм на вході	30 А
Номінальна напруга на виході	400 В
Максимальний вихідний струм	20А
Коефіцієнт потужності	1
ККД	98,6%

Денна генерація електричної енергії сонячною станцією з урахуванням втрат в провіднику і ККД при оптимальному навантаженню по DC прийнято використовувати 10 стрінгів по 18 панелей тобто з нашого розрахунку 10 сонячних трекерів на один інвертор:

$$E_{\text{день}} = (E_{\text{д}} \cdot n_{\text{st}}) \cdot 0.99 \cdot 0.98 \quad (2.12)$$

де  $n_{\text{st}}$  – кількість стрінгів (трекерів);

Наприклад для першого травня:

$$E_{\text{д}} = (53,2 \cdot 10) \cdot 0,99 \cdot 0,98 = 516,14 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (2,14)$$

Результат підрахунку річного вироблення приведений в таблицю. 2.6.

Таблиця 2.6 – Кількість виробленої електроенергії сонячною станцією по місяцях.

Місяць	Вироблено енергії, кВт*год
Січень	2 938,71
Лютий	4 897,86
Березень	8 163,09
Квітень	12 407,90
Травень	16554,76
Червень	16979,24
Липень	16652,71
Серпень	14367,05
Вересень	10448,76
Жовтень	6530,48
Листопад	3265,24
Грудень	2 938,71
Генерація за рік	113 205,80

Надалі буде визначено обсяг виробленої та спожитої електричної енергії фотоелектричною станцією із відслідковуючим пристроєм. Спершу треба визначити обсяг сонячної енергії, що надходить, на майданчик із трекером. Для цього використовується та сама методика обчислення, що й для нерухомих систем. Однак, у випадку із відслідковуючою системою, постійно змінюється не лише кут висоти та азимутний кут сонця, але також і кут нахилу одночасно з кутом повороту сонячних панелей. Така кількість змінних робить обчислення доволі заплутаним та об'ємним, що збільшує ймовірність появи похибок при ручному підрахунку. Тому, було ухвалено рішення використати спеціалізоване програмне забезпечення для розрахунку фотоелектричних систем – PVsyst V6.43. Ця програма дозволяє змодельовати функціонування фотоелектричної системи з будь-якими характеристиками, наданими користувачем. Також, PVsyst має власну базу даних устаткування, такого як сонячні панелі та інвертори. Крім того, програма має доступ до бази метеорологічних вимірів Meteogram. Після процедури моделювання, PVsyst надає користувачеві звіт про роботу змодельованої системи.

За підсумками моделювання фотоелектричної системи, що складається зі 180 сонячних панелей Trina Solar TSM-NEG21C.20 710W, змонтованих на відслідковуючих платформах та одного інвертора Huawei SUN2000-100KTL-M2, отримуємо річне вироблення електричної енергії: 113,205 МВт•год.

Отже, з погляду енергетичної ефективності, розумнішим є використання методу з алгоритмом керування з меншою точністю позиціонування. Це пов'язано з тим, що для забезпечення менш точного позиціонування потрібно витратити значно меншу кількість енергії, але при цьому генерація енергії зменшується не так суттєво. Варто зазначити, що така закономірність обмежується точністю позиціонування  $10^\circ$  для монокристалічних панелей, та  $30^\circ$  для полікристалічних і панелей з аморфного кремнію. Проте при виборі алгоритму для впровадження у реальних умовах варто спиратися не лише на енергетичну ефективність, але і на техніко-економічні показники.

### 3 МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ

Для реалізації базової роботи електромеханічної системи керування сонячної фотоелектричної станції, вистачає базового програмного коду, який виконує функції реактивного відстеження руху сонця.

Реактивне відстеження за допомогою LDR-датчиків (Light Dependent Resistor – світло-залежний резистор) – це найпростіший і найпоширеніший метод, який використовується в сонячних трекерах для пошуку максимальної освітленості в реальному часі та спрямування сонячної панелі або іншого пристрою в цей бік.

Розглянемо переваги та недоліки даного режиму роботи (таблиця 3.1 та таблиця 3.2 відповідно).

Таблиця 3.1 – переваги реактивного LDR-відстеження

№	Перевага	Детальний Опис
1	Простота та надійність	Алгоритм надзвичайно простий: він порівнює освітленість на протилежних сторонах панелі (верх/низ, ліво/право). Це мінімізує кількість коду, виключає складну математику (наприклад, астрономічні розрахунки) та є легко зрозумілим.
2	Автономність	Трекер працює повністю автономно. Йому не потрібен зовнішній зв'язок (GPS, час, інтернет, зв'язок із ML-хостом), оскільки він реагує на світло тут і зараз.

Продовження таблиці 3.1

3	Відстеження точки відбору максимальної потужності	Система завжди намагається знайти місце з максимальною освітленістю, незалежно від того, чи це пряме сонячне світло, чи яскрава хмара. Це часто ефективніше, ніж чисте астрономічне відстеження, якщо сонце закрите.
4	Низька обчислювальна складність	Arduino Uno легко справляється з цим кодом, оскільки він включає лише просте додавання, віднімання та порівняння. Це робить цикл loop() швидким та ефективним.
5	Локальне регулювання	Використання потенціометрів для d-time (затримка) та tol (допуск) дозволяє легко налаштувати чутливість та швидкість реакції трекера без перепрошивки коду.

Таблиця 3.2 – Недоліки реактивного LDR-відстеження

№	Недолік	Детальний Опис
1	Чутливість до хмар та відблисків	Це головний недолік. Трекер може бути "збитий з пантелику" яскравими хмарами або відбитим світлом (наприклад, від ближнього даху або снігу), оскільки він завжди прямує туди, де світло найяскравіше, а не туди, де повинно бути сонце.
2	Вразливість до внутрішніх помилок	Якщо один із чотирьох LDR-датчиків вийде з ладу або забрудниться, система може почати неконтрольовано рухатися або застрягне, оскільки її баланс порушиться.

## Продовження таблиці 3.2

3	Неефективність у хмарну погоду	У похмурий день, коли світло розсіяне і рівномірне, LDR-датчики дають майже однакові показання. Трекер може залишитися нерухомим
4	Постійний рух (дрижання сервоприводу)	Через наявність допуску (tol) і постійного незначного коливання освітленості (навіть у сонячний день), трекер може постійно робити маленькі корекційні рухи (Micro-Adjustments). Це призводить до витрат енергії (сервоприводи постійно споживають струм).
5	Відсутність нічного режиму	У коді немає логіки для визначення ночі. Сервоприводи залишаються у випадковому положенні, що може збільшити вітрові навантаження вночі, а також призводить до непотрібного споживання енергії.

Перехід із реактивного LDR-відстеження на проактивне керування на основі ML-прогнозу (Machine Learning) – це інтелектуальний підхід, який замінює реакцію на поточні умови (LDR) на дію, засновану на передбаченні майбутніх умов.

Це передбачення дозволяє системі оптимізувати положення панелей для максимальної генерації енергії заздалегідь, з урахуванням прогнозу погоди та хмарності.

Ось основні переваги такого переходу:

1. Оптимізація генерації енергії (проактивність). Це найважливіша здатність передбачати умови, а не лише реагувати на них. Зокрема відбувається:

- прогноз хмарності та корекція Кутів. ML-модель навчається на патернах хмарності. Якщо модель прогнозує високу хмарність, вона може

заздалегідь скорегувати кут нахилу панелі, щоб максимально захоплювати розсіяне світло, яке часто є найефективнішим при похмурій погоді. Реактивний LDR-трекер у таких умовах може просто "загубитися" або застигнути.

- уникнення "сліпих зон". Трекер слідує за обчисленим астрономічним положенням Сонця, коригуючи його прогнозом. Це гарантує, що трекер не "збивається" на локальні джерела світла (відблиски, яскрава хмара), як це трапляється з LDR.

- оптимізація MPPT (Maximum Power Point Tracking): Оскільки модель прогнозує сонячну іррадіацію (з точністю до 95% за вашою умовою), вона може надіслати трекеру та/або інвертору дані для оптимізації точки максимальної потужності заздалегідь, збільшуючи загальну ефективність системи.

2. Зменшення зносу та енергоспоживання. Перехід на прогнозний режим значно продовжує термін служби механізмів:

- мінімізація руху (зменшення зносу): замість постійного "дрижання" сервоприводів, як у LDR-системі, ML-режим надсилає нові команди позиціонування лише через певні, ефективні інтервали (наприклад, кожні 5 або 15 хвилин). Це зменшує механічний знос сервоприводів та їхніх редукторів.

- енергозбереження: обмеження непотрібних рухів прямо призводить до меншого споживання електроенергії сервоприводами, вивільняючи цю енергію для мережі.

- ефективний нічний режим: модель може точно передбачити захід сонця і заздалегідь перевести панель у безпечне/горизонтальне положення на ніч. Це захищає її від вітрових навантажень та повністю вимикає керуючий рух на період темряви.

3. Можливості інтеграції та масштабування. ML-підхід перетворює трекер на інтелектуальний елемент великої системи:

- централізоване керування: всі трекери можуть керуватися однією централізованою ML-моделлю на хост-системі (наприклад, Raspberry Pi або сервер), що спрощує моніторинг і оновлення.

- адаптивність: модель може автоматично навчатися на нових даних і паттернах погоди, постійно покращуючи свою точність і, відповідно, ефективність відстеження з часом. [35].

- інтеграція з метеоданими: можливість використовувати професійні метеопрогнози (API) у реальному часі для найточнішого прогнозування, що недоступно для автономного LDR-трекера.

- автоматична діагностика: хост-система може відстежувати, чи правильно Arduino реалізує команди. Якщо заданий кут не досягається, система може діагностувати несправність сервоприводу або механізму.

Спочатку потрібно оновити код Arduino для отримання та застосування прогнозних відомостей від зовнішньої ML-моделі. Оскільки Arduino Uno не має достатньо ресурсів (пам'яті, швидкості) для виконання складної моделі LSTM або Random Forest та опрацювання великих масивів метеоданих, оновлення має бути виконане за схемою "Arduino + Зовнішній сервер" (наприклад, комп'ютер або Raspberry Pi). [35] Приклад подано на рисунку 3.1



Рисунок 3.1 – Одноплатний комп'ютер Raspberry Pi

Для модернізації ми замінимо поточний алгоритм, заснований на LDR-датчиках, на алгоритм, що приймає бажані координати (кути) від зовнішньої системи:

1. Зовнішній хост (ПК/Raspberry Pi): запускає ML-модель. Прогнозує оптимальні кути на найближчу годину/добу.
2. Зв'язок: хост надсилає ці кути до Arduino через Serial-порт.
3. Arduino Uno: отримує кути та встановлює їх на сервоприводах.
4. Модернізований код Arduino (C++), код на Arduino замінить логіку LDR-відстеження на логіку прийому та встановлення кутів через послідовний порт.

Ключові зміни: Видаляємо весь код LDR-відстеження. Додаємо логіку для зчитування та парсингу даних з послідовного порту. Зберігаємо LDR-датчики лише для коригувального режиму або як запобіжник.

Приклад зміненого коду:

```
#include <Servo.h>

Servo horizontal; // Горизонтальний сервопривід
int servoh = 90; // Поточний кут
Servo vertical; // Вертикальний сервопривід
int servov = 90; // Поточний кут
// *** Додаткові змінні для прогнозного керування ***
const int LDR_THRESHOLD = 50; // Поріг для перевірки
хмарності/темряви
int ldrlt = 0; // LDR top left (залишаємо для резервної перевірки)
int ldrrt = 1; // LDR top rigt
void setup() {
  Serial.begin(9600); // Ініціалізація послідовного зв'язку
  horizontal.attach(9);
```

```

vertical.attach(10);
// Початкове позиціонування
horizontal.write(servoh);
vertical.write(servov);
Serial.println("Solar Tracker Initialized. Waiting for ML data...");
}
// Функція для парсингу отриманих даних: "HxxVyy"
// Приклад: "H120V45" означає H=120, V=45
void process_serial_data() {
    if (Serial.available() > 0) {
        String data = Serial.readStringUntil('\n'); // Читаємо рядок до
символу нового рядка
        data.trim(); // Видаляємо зайві пробіли/символи

        if (data.length() >= 5 && data.charAt(0) == 'H' && data.indexOf('V')
!= -1) {
            // Знаходимо позицію 'V'
            int v_index = data.indexOf('V');
            // Парсимо горизонтальний кут (після 'H', до 'V')
            String h_str = data.substring(1, v_index);
            int new_servoh = h_str.toInt();
            // Парсимо вертикальний кут (після 'V')
            String v_str = data.substring(v_index + 1);
            int new_servov = v_str.toInt();
            // Перевірка діапазону (0-180)
            if (new_servoh >= 0 && new_servoh <= 180 && new_servov >= 0
&& new_servov <= 180) {
                // Успішно отримано нові прогнозні кути
                servoh = new_servoh;

```

```

servov = new_servov;
horizontal.write(servoh);
vertical.write(servov);
Serial.print("ML Forecast applied: H=");
Serial.print(servoh);
Serial.print(", V=");
Serial.println(servov);
    }
}
}
}
void loop() {
    // 1. Прийом та обробка прогнозних кутів від ML-моделі
    process_serial_data();
    // 2. (ОПЦІЙНО) Перевірка за допомогою LDR для *РЕАЛЬНОГО*
часу
    // Якщо модель помилилась (наприклад, несподівана хмара), цей блок
    // може служити механізмом корекції.
    int lt = analogRead(ldrlt);
    int rt = analogRead(ldrrt);
    int avg_light = (lt + rt) / 2;
    if (avg_light < LDR_THRESHOLD) {
        // Режим "Низька освітленість" або "Ніч"
        // Тут можна додати логіку для повернення панелі в
горизонтальне/безпечне положення
        // Або перехід у режим економії енергії
        // vertical.write(0); // Приклад: повернення в нульове положення
        // horizontal.write(90); // Приклад: повернення в нульове положення
    }
}

```

```

// Затримка, наприклад, 1 секунда. Зовнішня система має надсилати
нові
// кути відповідно до свого інтервалу прогнозу (наприклад, раз на 5
хвилин).
    delay(1000);
}

```

Після модернізації виконавчого коду Arduino розпишемо подальші етапи для реалізації модифіковано принципу керування електромеханічною системою керування сонячної фотоелектричної станції

**Етап: №1** Прогнозування (Хост-система ML), яке відбувається на зовнішньому, потужнішому пристрої (ПК, сервер, Raspberry Pi), який виконує складні обчислювальні завдання.

Перший етап ділиться ще на два під етапи: збір вхідні дані та навчання моделі та формування прогнозу:

1.1. Вхідні дані та навчання моделі – ML-модель навчається на великому обсязі історичних даних:

- метеодані: прогноз хмарності (ключовий фактор), атмосферний тиск, температура, вологість.
- історичні дані генерації: фактична потужність, яку виробляла СЕС у минулому за певних погодних умов та положень трекера.
- астрономічні дані: теоретичне положення сонця (азимут та висота) у будь-який момент часу.

1.2 Формування прогнозу – модель використовує ці дані, щоб прогнозувати оптимальне положення трекера на наступні 24 - 48 годин із певним інтервалом (наприклад, кожні 5 хвилин)):

- корекція на хмарність: якщо прогнозується сильна хмарність, модель не слідує за прямим сонцем, а визначає кут, який максимізує захоплення

розсіяного світла. Це може означати більш горизонтальне або південне положення.

- вихід моделі: на виході формуються бажані координати – горизонтальний та вертикальний кути

**Етап №2:** Зв'язок та передача даних. Цей етап забезпечує надійну доставку прогнозних даних до пристрою керування.

2.1. Форматування Команди (Python Скрипт). Хост-система форматує прогнозні кути у стандартизований рядок, зрозумілий для мікроконтролера. Приклад формату: H125V38\ (де 125° — горизонтальний кут, 38° — вертикальний кут, \n — символ закінчення команди).

2.2. Надсилання (Послідовний Порт). Скрипт на хості (наприклад, Python з бібліотекою pyserial) передає цю команду на Arduino через послідовний порт (USB/UART).

**Етап №3:** Виконання (Arduino Uno) Мікроконтролер (Arduino) слугує виконавчим механізмом, який приймає та реалізує команди:

3.1. Прийом та парсинг. Arduino постійно слухає послідовний порт. Отримавши рядок, він виконує:

- читання повного пакета даних до символу \n.
- парсинг: виділення числових значень кутів (125 та 38).
- валідація: перевірка, чи знаходяться кути у безпечному діапазоні (0°–180°), щоб запобігти пошкодженню сервоприводів.

3.2. Виконання команди:

- рух сервоприводів: Arduino безпосередньо надсилає команду сервоприводам: `horizontal.write(125)` та `vertical.write(38)`.

- циклічність: система залишається в цьому положенні, доки хост-система не надішле наступний, оновлений прогноз (наприклад, через 5 хвилин).

**Етап №4:** Резервування та Failsafe. Це критично важливо, оскільки зовнішній зв'язок може бути нестабільним:

4.1. Контроль сплячого режиму. Модель прогнозує час заходу сонця і надсилає команду "Ніч" або безпечне положення заздалегідь.

4.2. Резервна Логіка (LDR). LDR-датчики не використовуються для постійного керування, але вони залишаються як індикатор:

- перевірка темряви: якщо освітленість падає нижче критичного порогу, Arduino ігнорує усі команди хоста (навіть помилкові) і переводить панель у безпечне нічне положення.

- втрата зв'язку: якщо Arduino не отримує нових даних від хоста протягом тривалого часу, він може тимчасово перейти на простий, локальний (LDR- або астрономічний) алгоритм, щоб уникнути повної бездіяльності.

Про активне керування дозволяє трекеру завжди бути на крок попереду, максимізуючи ефективність і зменшуючи механічний знос, що є значним поліпшенням порівняно з простим LDR-відстеженням.

Схема підключення системи прогнозування (Хост-система ML), яка відбувається на зовнішньому Raspberry Pi до схеми керування на вже існуючі логіці Arduino. Рисунок 3.2.

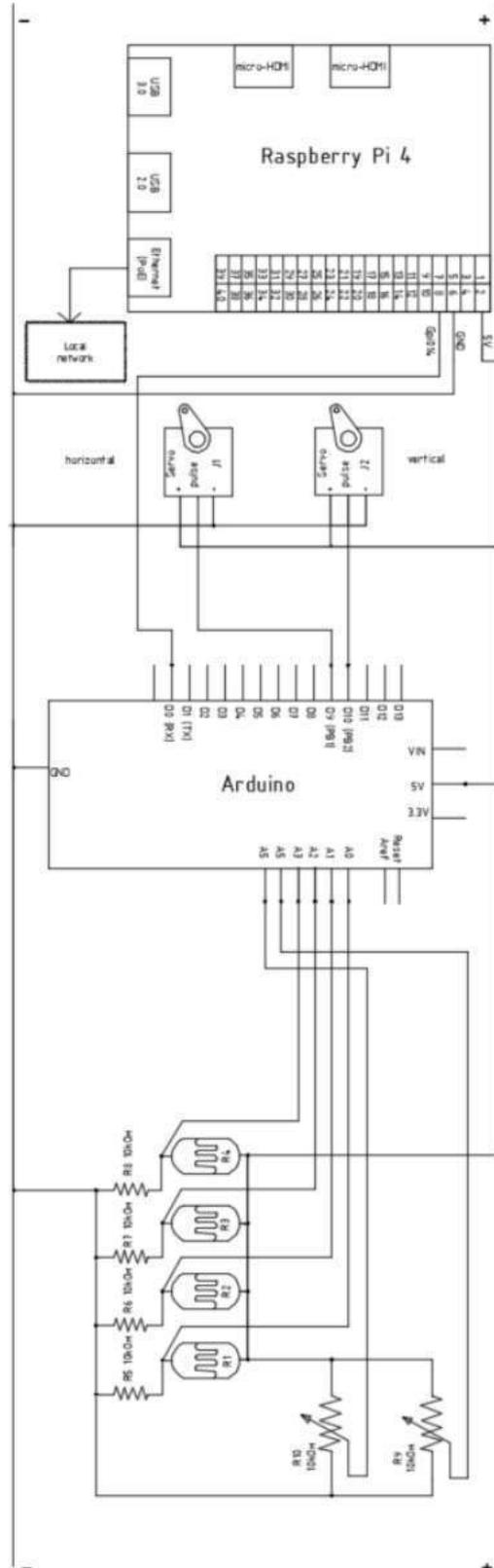


Рисунок 3.2. Принципова схема підключення логіки елементів з системою прогнозування

Приклад коду на Python для керуючої хост-системи ML для нашої електромеханічної системи.

```

import serial
import time

# Приклад: from keras.models import load_model
# your_ml_model = load_model("model.h5")

# Налаштування порту
# Windows: 'COM3'
# Linux / Raspberry Pi: '/dev/ttyACM0'
ser = serial.Serial('COM3', 9600, timeout=1)

# Дати Arduino час на ініціалізацію
time.sleep(2)
def get_ml_prediction():
    """
    КЛЮЧОВА ФУНКЦІЯ
    Тут має викликатися ML-модель
    """

    # 1. Отримати поточні метеодані
    # current_weather_data = ...

    # 2. Отримати прогноз моделі
    # optimal_angles = your_ml_model.predict(current_weather_data)

    # ПРИКЛАД (заглушка)

```

```

predicted_h = 125
predicted_v = 38

# Альтернатива для хмарного дня:
# predicted_h = 90
# predicted_v = 0

return predicted_h, predicted_v

while True:
    h_angle, v_angle = get_ml_prediction()

    # Формат: H<кут_H>V<кут_V>\n
    data_to_send = f"H{h_angle}V{v_angle}\n"
    try:
        ser.write(data_to_send.encode('utf-8'))
        print(f"Sent to Arduino: {data_to_send.strip()}")
    except Exception as e:
        print(f"Error sending data: {e}")

    # Надсилати прогноз кожні 5 хвилин
    time.sleep(300)

```

Наступним кроком буде налаштування Python-скрипту для зв'язку з Arduino для цього потрібно встановити необхідну бібліотеку Python. А саме нам знадобиться бібліотека *pyserial* для зв'язку з послідовним портом. Після встановлення відкриваємо термінал або командний рядок на вашому комп'ютері (де буде працювати ML-модель) і виконайте команду: «`pip install pyserial`»

Приклад оновленого Python-скрипту (Симуляція ML-прогнозу) Цей скрипт симулює роботу вашої ML-моделі, надсилаючи різні кути на Arduino через послідовний порт кожні 15 секунд.

```

import serial
import time
import random

#=====
# === НАЛАШТУВАННЯ: ОБОВ'ЯЗКОВО ЗМІНІТЬ ПОРТ! ===
SERIAL_PORT = 'COM3' # Windows: COMx | macOS:
/dev/cu.usbmodemXXXX | Linux: /dev/ttyACM0
BAUD_RATE = 9600
#=====

SIMULATED_FORECASTS = [
    (90, 0),
    (120, 30),
    (150, 60),
    (100, 45),
    (70, 20),
]

def initialize_serial(port, baud):
    try:
        ser = serial.Serial(port, baud, timeout=1)
        time.sleep(2)
        print(f"✓ Успішно підключено до порту {port} ({baud} бод).")
        return ser

```

```
except serial.SerialException as e:
    print(f"✘Помилка підключення до порту {port}: {e}")
    return None
```

```
def send_angles(ser, h_angle, v_angle):
    data_to_send = f"H{h_angle}V{v_angle}\n"
    try:
        ser.write(data_to_send.encode('utf-8'))
        print(f"-> Надіслано: {data_to_send.strip()}")
        return True
    except Exception as e:
        print(f"✘Помилка надсилення: {e}")
        return False
```

```
def listen_for_response(ser):
    while ser.in_waiting > 0:
        response = ser.readline().decode('utf-8').strip()
        if response:
            print(f"<- Arduino: {response}")
```

```
#=====
# === ГОЛОВНИЙ ЦИКЛ ===
#=====
```

```
if __name__ == "__main__":
    arduino = initialize_serial(SERIAL_PORT, BAUD_RATE)

    if arduino:
        print("-" * 40)
        try:
```

```

while True:
    for h, v in SIMULATED_FORECASTS:
        send_angles(arduino, h, v)
        listen_for_response(arduino)

        print("\n--- Очікування наступного прогнозу (15 сек.) ---")
        time.sleep(15)

except KeyboardInterrupt:
    print("\n □ Програму зупинено користувачем (Ctrl+C).")

except Exception as e:
    print(f" ✘ Виявилась несподівана помилка: {e}")

finally:
    if arduino.is_open:
        arduino.close()
        print(" □ Послідовний порт закрито.")

```

Щоб повністю реалізувати вашу умову, вам залишиться інтегрувати вашу ML-модель у функцію `get_ml_prediction` (яку я замінив симуляцією) у Python-скрипт

Повинні виконуватись наступні кроки:

1. Підготовка даних: зберіть історичні дані генерації СЕС та метеодані (температура, тиск, вологість, хмарність).
2. Навчання ML: навчіть вашу модель LSTM (для часових рядів) або Random Forest (для класифікації/регресії) прогнозувати оптимальні кути або сонячну іррадіацію.

3. Визначення кутів: модель повинна видавати оптимальні кути для наступного інтервалу, які потім надсилаються на Arduino.

Для інтеграції нашої ML-моделі прогнозування з сонячним трекером на Arduino. Оскільки ми розділили систему на дві частини (хост-система з ML та Arduino для керування) Наша умова передбачає використання ML-моделей (LSTM або Random Forest) для прогнозування оптимальних кутів.

Хост-система (наприклад, Raspberry Pi або ПК) виконує найскладнішу роботу а саме:

1. Збір та підготовка даних від яких залежить якість прогнозу:

- вхідні дані (метеодані): генерація СЕС (кВт), показники хмарності ).

Ключовий фактор для корекції кутів – температура повітря, вологість, швидкість вітру.

- часові характеристики: день року, година доби.

- вихідні дані (цільові змінні): ідеальний горизонтальний кут та вертикальний кут панелі, які дають максимальну потужність.

2. Модельний алгоритм та прогноз:

- модель LSTM (для часових рядів) – цей тип моделі ідеально підходить, оскільки прогноз залежить від історії даних (минулі 24-48 годин).

- архітектура: використовуйте шари LSTM для вилучення часових патернів, за якими слідує один або кілька щільних (Dense) шарів для виведення кутів.

- вихід: модель повинна прогнозувати оптимальні на наступний інтервал часу (наприклад, кожні 5-15 хвилин протягом наступних 24–48 годин).

3. Модель Random Forest (для класифікації/регресії). Якщо ви спрощуєте задачу до класифікації погодних патернів (наприклад, "Сонячно", "Сильна хмарність", "Опади"):

- прогноз: модель класифікує поточний/майбутній патерн.

- коригування: кожному патерну присвоюється стратегія позиціонування (наприклад, "Сонячно" – астрономічний кут, "Сильна

хмарність" – панель піднімається горизонтально для захоплення розсіяного світла).

Також наведемо таблицю 3.3 в якій розписаний алгоритм з циклічного надсилання даних на виконавчий механізм нашого сонячного трекера.

Таблиця 3.3 – Алгоритм з циклічного надсилання даних

Крок	Дія	Призначення
1.	Отримання/завантаження актуальних метеоданих.	Потрібні свіжі вхідні дані для прогнозу.
2.	Прогноз ML.	Виклик <code>ml_model.predict()</code> , отримання кутів.
3.	Форматування.	Перетворення кутів на рядок формату <code>H&lt;кут&gt;V&lt;кут&gt;\n</code> (наприклад, <code>H125V38\n</code> ).
4.	Надсилання.	Використання <code>pyserial.write()</code> для передачі на Arduino.
5.	Очікування.	Затримка ( <code>time.sleep()</code> ), яка відповідає інтервалу прогнозу (наприклад, 300 секунд).
6.	Повторення.	Повернення до кроку 1.

Отже, було розглянуто необхідність модернізації електромеханічної системи керування сонячної електростанції шляхом переходу від простого реактивного LDR-відстеження до проактивного керування на основі прогнозу. Базовий LDR-метод, хоча і є простим, але є критично чутливий до хмар та відблисків, а також спричиняє надмірний механічний знос через постійні корекційні рухи сервоприводів. Проактивний підхід використовує ML-модель (LSTM або Random Forest) на зовнішньому Хості для прогнозування оптимальних кутів з урахуванням прогнозу хмарності та історичних даних. Цей інтелектуальний метод дозволяє оптимізувати генерацію енергії, корегуючи положення панелі для захоплення розсіяного світла та мінімізуючи безперервний рух механізмів.

Керування реалізується через послідовний зв'язок, де Хост-система надсилає прогнозні координати, а Arduino Uno приймає, та встановлює ці кути. Для забезпечення надійності, LDR-датчики залишаються як резервна логіка (failsafe), виконуючи функцію перевірки темряви та запобігаючи неконтрольованому руху у разі втрати зв'язку.

## **4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ**

Техніко-економічне обґрунтування є ключовим етапом оцінки доцільності впровадження автоматизованої системи керування мережею сонячної електростанції з інтегрованими установками зберігання енергії. Воно дозволяє визначити економічні переваги, технологічні вигоди та очікуваний ефект від модернізації енергетичної інфраструктури підприємства. Запропонована система автоматизації спрямована на підвищення енергоефективності, забезпечення більш ефективного та стабільного функціонування СЕС в порівнянні з уже існуючою СЕС на підприємстві яка за 2024–2025 рр. система забезпечила 25% покриття енергопотреб птахофабрики, зекономивши 1,2 млн грн на електроенергії. Тому удосконалення такої СЕС з використанням електромеханічної системи керування дозволить збільшити економію та покращити використання енергії сонця для власних потреб.

Виконання техніко-економічних розрахунків дає змогу обґрунтувати економічну доцільність впровадження та визначити очікуваний фінансовий результат для підприємства.

### **4.1 Технічне обґрунтування вибору складових електромеханічної системи**

Розглянутий об'єкт є діючою мережею сонячною електростанцією, яка має встановлену потужність 1080 кВт DC та інверторну потужність 500 кВт AC. Фотоелектричне поле станції сформоване з 1080модулів JAM72S30-545/MR, що відзначаються високою ефективністю, стабільністю роботи в умовах мінливої сонячної активності та підтвердженою надійністю матеріалів. Сукупна встановлена потужність DC формує оптимальний енергетичний

ресурс для роботи інверторної частини та реалізації алгоритмів енергоменеджменту.

Перетворення постійного струму в змінний здійснюється за допомогою 5 мережевих інверторів Huawei SUN2000-100KTL-M2, кожен номінальною потужністю 100 кВт. Це сучасні трифазні інвертори з високим ККД (до 98,7%), широким діапазоном роботи MPPT, підтримкою високовольтних стрингів і розвиненими функціями комунікації.

Співвідношення DC/AC = 1,28 для даної СЕС є технічно оптимальним. Воно забезпечує повніше використання потенціалу сонячного масиву протягом року, компенсує ранкові та вечірні зниження генерації. Дана станція довела свою ефективність протягом року використання покривавши значну частину енергоспоживання. Але через те що СЕС змонтована на існуючих покрівлях птахофабрики які розміщені не під оптимальним кутом . Було прийняте рішення збудувати ще одне сонячне поле на вільні ділянці під забудову , яке буде максимально поглинати сонячне випромінювання протягом доби для максимальної генерації, і найкращим рішенням для цього є сонячні трекери які відслідковують рух сонця протягом доби для максимізації генерації потужності.

У межах роботи було проаналізовано наявні на ринку трекінгові системи стеження, після чого прийнято рішення застосувати двовісний трекер. Це пристрій, що відстежує положення Сонця у двох площинах (двох осях) і забезпечує орієнтацію сонячної панелі або дзеркала таким чином, щоб вони залишалися максимально перпендикулярними до сонячних променів.

Під час вибору системи керування електроприводом для сонячного трекера важливо розуміти принцип роботи такого керування. Для повороту панелей за допомогою електроприводу необхідно використовувати щонайменше 2–4 фоторезистори та інше відповідне апаратне забезпечення.

Функцію керуючого блока виконує мікроконтролер, який обробляє сигнали від датчиків і на їх основі задає напрямок руху сонячних панелей.

Отже, обираючи систему керування електроприводом, слід враховувати два ключові моменти.

По-перше, використовується саме асинхронний двигун, оскільки він є ефективнішим у подібних застосуваннях порівняно з двигуном постійного струму (ДПС).

По-друге, керування таким двигуном за допомогою альтернативних засобів, зокрема перетворювача частоти (ПЧ) чи релейно-контакторної системи (РКС-АД), є недоцільним. Це пов'язано з тим, що основна ідея проєкту полягає у безперервному відстеженні положення Сонця та керуванні приводом відповідно до інтенсивності сонячного випромінювання, а не за наперед заданим алгоритмом руху.

## **4.2 Економічне обґрунтування вибору складових електромеханічної системи керування сонячної фотоелектричної станції**

### **4.2.1 Визначення капітальних вкладень**

Вартість кожного із елементів автоматизованої системи керування мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання електроенергії представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Кошторис капіталовкладень

<b>Елементи електротехнічного комплексу</b>	<b>Ціна, грн.</b>
Мережевий інвертор Huawei SUN2000-100KTL-M2 (100 кВт) (1 шт.)	233 750,02
Фотогальванічні панелі Trina Solar TSM-NEG21C.20 710W (180 шт.)	887 400
Пристрій керування SmartLogger 3000A (1шт.)	52 275,02
Кріплення СЕС: метал для побудови трекара (10 компл.)	580 000
Електропривод для побудови трекара (10 компл.)	613 770

Продовження таблиці 4.1.

Система керування сонячним трекером (10 компл.)	25 000
DC- PV 1×6 мм <sup>2</sup> — 1860 м; конектори MC4 — 280 шт.	128 880,89
АС-кола: АВВГнгд 4×95 — 265 м;	127 730
<b>Елементи електротехнічного комплексу</b>	<b>Ціна, грн</b>
Зв'язок: Cat. 5e F/UTP PE 4x2x24 – 500м	14 092,3
Щитові вироби: шафа 800×600×200 — 1 шт; шафа 400×500×200 — 1 шт.	145 680,02
Кабельні лотки та кріплення для прокладання: 50×50 — 100 м; 100×50 — 190 м;	180 351,13
Заземлення: вертикальні електроди D16×1500 — 16 шт; дріт Al D10 — 860 м; смуга 25×4 — 30 м.	205 917,20
Комутація та вимірювання: A2B 250 TMF 160A — 1 шт; ТТ 300/5 — 3 шт;;	12 455,6
<b>Загальна вартість СЕС</b>	<b>3 207 301,91</b>
Транспортні витрати та монтажні витрати (13%)	<b>416 949,25</b>
Витрати на будівельні роботи (10%)	<b>320 730,191</b>
Капітальні витрати (інвестиції) СЕС	<b>3 944 981,351</b>

Для визначення капітальних вкладень потрібно до загальної вартості обладнання додати також і вартість його доставки, монтаж цього обладнання та витрати на будівництво. А також потрібно розрахувати амортизаційні відрахування.

Вартість доставки обладнання розраховуються в залежності від відстані, маси вантажу та тарифу залізничного перевезення на відстань одного кілометра тони вантажу. Монтажні роботи розраховуються відповідно до нормативів вартості монтажних робіт. Спрощуючи розрахунок, вартість доставки та монтажних робіт, можна прийняти рівними 13% від загальної вартості обладнання:

$$C_{DM} = C_{\Sigma} \cdot 0,13 \text{ (грн.)}, \quad (4.1)$$

$$C_{DM} = 3\,207\,301,91 \cdot 0,13 = 416\,949,25 \text{ (грн.)}.$$

Витрати на будівельні роботи (влаштування фундаментів) розраховують виходячи із нормативів витрат на будівництво. Даний норматив для укрупнення розрахунку приймається рівним 10% від вартості обладнання:

$$C_B = C_{\Sigma} \cdot 0,1 \text{ (грн.)}, \quad (4.2)$$

$$C_B = 3\,207\,301,91 \cdot 0,1 = 320\,730,191 \text{ (грн.)}.$$

Амортизаційні відрахування знаходяться із добутку норми амортизації на первісну вартість об'єкту основних фондів:

$$A_p = \frac{C_{\Sigma} \cdot H_A}{100\%}, \quad (4.3)$$

де  $H_A$  – норма амортизації (при умові, що термін експлуатації СЕС та УЗЕ приймемо за 20 років норма амортизації буде рівною 5%)

$$A_p = \frac{3\,207\,301,91 \cdot 5\%}{100\%} = 160\,365,09 \text{ (грн.)}.$$

#### 4.2.2 Розрахунок заробітної плати обслуговуючого персоналу

Відповідно до правил влаштування електроустановок обслуговувати установки до 1000 В може робітник, у якого розряд не нижче четвертого, а група допуску по електробезпеці не нижче третьої.

Розрахунок витрат на заробітну плату обслуговуючого персоналу виконується за наступною формулою:

$$C_3 = C_{30} + C_{3Д}, \quad (4.4)$$

де  $C_{30}$  – основна заробітна плата по тарифу;

$C_{3Д}$  – додаткова заробітна плата.

$$C_{30} = N \cdot T_1 \cdot K \cdot \Phi_{\text{еф}} \cdot K_C \cdot \beta, \quad (4.5)$$

де  $N$  – кількість робітників які обслуговують автоматизованої системи керування СЕС та УЗЕ ( $N = 1$  чол.);

$T_1$  – годинна тарифна ставка робітника першого розряду ( $T_1 = 45$  грн.);

$K$  – тарифний коефіцієнт (для робітника четвертого розряду:  $K = 2,03$ . Із таблиці 4.2);

$K_C$  – коефіцієнт співвідношень, що встановлений Генеральною угодою між профспілками і урядом ( $K_C = 1$ );

$\beta$  – відношення часу, затраченого робітником, на обслуговування установки відносно загального часу своєї роботи ( $\beta = 1$ );

$\Phi_{\text{еф}}$  – ефективний фонд часу обслуговування автоматизованої системи керування СЕС та УЗЕ:

$$\Phi_{\text{еф}} = \varepsilon \cdot Z_{\text{РД}} \cdot Z_{\text{РЗ}} \cdot t_{\text{РЗ}}, \quad (4.6)$$

де  $\varepsilon$  – відносна тривалість увімкнення ( $\varepsilon = 0,5$ );

$Z_{\text{РД}}$  – кількість робочих днів за рік ( $Z_{\text{РД}} = 250$  днів/рік);

$Z_{\text{РЗ}}$  – кількість робочих змін ( $Z_{\text{РЗ}} = 1$ );

$t_{\text{РЗ}}$  – тривалість робочої зміни ( $t_{\text{РЗ}} = 1$ ).

Таблиця 4.2 – Тарифна сітка працівників погодинної оплати праці

Тарифні розряди	I	II	III	IV	V	VI
Тарифні коефіцієнти	1	1,5	1,8	2,03	2,33	2,7

Розраховуємо ефективний фонд часу обслуговування автоматизованої системи керування СЕС та УЗЕ та основну заробітну плату по тарифу:

$$\Phi_{\text{еф}} = 0,5 \cdot 250 \cdot 1 \cdot 1 = 125 \text{ (год./рік)}.$$

$$C_{30} = 1 \cdot 45 \cdot 2,03 \cdot 125 \cdot 1 \cdot 1 = 11\,418,75 \text{ (грн.)}.$$

Додаткова заробітна плата (премія) становить 10% від розміру основної заробітної плати і відповідно становить:

$$C_{зд} = 11\,418,75 \cdot 0,1 = 1\,141,87 \text{ (грн.)}$$

В цілому загальні витрати на заробітну плату обслуговуючого персоналу автоматизованої системи керування СЕС становитиме:

$$C_3 = 11\,481,75 + 1\,141,87 = 12\,623,6 \text{ (грн.)}$$

#### **4.2.3 Розрахунок витрат на поточний ремонт обладнання**

Поточний ремонт обладнання автоматизованої системи керування та енергетичної інфраструктури проводиться безпосередньо на місці його встановлення з повним або частковим відключенням окремих елементів мережі. Для виконання ремонтних робіт залучається кваліфікований персонал, який забезпечує безпечну зупинку, відключення і подальше введення в експлуатацію обладнання.

Фінансові витрати на проведення ремонтів включають в себе вартість комплектуючих, запасних частин, кабельно-провідникової продукції, модулів комутації, вимірювальних трансформаторів та інших елементів, що підлягають заміні або регламентному обслуговуванню. Крім того, до складу витрат входить оплата праці фахівців з технічного обслуговування, налагодження та діагностики, які виконують весь комплекс робіт з підтримання працездатності системи.

Найбільш трудомісткими з точки зору ремонту є елементи мережевої архітектури СЕС. Фотомодулі, інвертори, електричні привода, комунікаційні модулі та силові вимикачі працюють у змінних температурних і електричних навантаженнях, що потребує регулярного огляду, очищення, підтягування контактів, а у випадку виходу з ладу – демонтажу та заміни окремих секцій

Графік планових попереджувальних ремонтних робіт представлено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Графік планових ремонтних робіт

Найменування обладнання	Види ремонтних робіт по місяцях												Трудомісткість, люд-год.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Фотомодулі та кріплення СЕС			12			12			12			16	52
Інвертори мережеві (8 шт.)		8			8			8			10		34
УЗЕ (шафи, BMS/PCS)	10			10			10			10			40
EMS/контролери/ зв'язок			6			6			6			6	24
Кабельні мережі DC/AC			6			6			6			6	24
РУ-0,4кВ, вимикачі, КТ/лічильники		6									6	6	18
Дизель-генератор (ДГУ)	6			6			6			6			24
	Загальна трудомісткість												216

Виконання даних ремонтних робіт, будемо вважати, проводитиметься електромонтером шостого розряду. Відповідно до того, що є відомими кількість годин виділених на проведення ремонтних робіт основна заробітна плата працівника знаходитиметься із наступної формули:

$$C_{\text{ЗОР}} = T_1 \cdot K \cdot \Phi_{\text{ефр}} \text{ (грн.)}, \quad (4.7)$$

$$C_{\text{ЗОР}} = 45 \cdot 2,7 \cdot 216 = 26244 \text{ (грн.)}.$$

Величина додаткової заробітної плати ремонтного персоналу становить 20%, визначається високим рівнем кваліфікації працівника, який має в разі потреби ремонтувати декілька самодостатніх електромеханічних пристроїв (СЕС, УЗЕ та автоматизованої системи керування):

$$C_{ЗДР} = C_{ЗОР} \cdot 0,2 \text{ (грн.)}, \quad (4,8)$$

$$C_{ЗДР} = 26244 \cdot 0,2 = 5248,8 \text{ (грн.)}.$$

Відповідно витрати на оплату праці ремонтного персоналу складатимуть:

$$C_{ЗР} = C_{ЗОР} + C_{ЗДР} \text{ (грн.)}, \quad (4.9)$$

$$C_{ЗР} = 26244 + 5248,8 = 31492,8 \text{ (грн.)}.$$

Витрати на комплектуючі, запасні частини та інші елементи розраховуються відносно основної заробітної плати ремонтного персоналу, і становлять 15 % від її величини.

$$C_{К} = C_{ЗОР} \cdot 0,15 \text{ (грн.)}, \quad (4.10)$$

$$C_{К} = 26244 \cdot 0,15 = 3936,6 \text{ (грн.)}.$$

Величина загальних річних експлуатаційних витрат розраховується наступним чином:

$$C_{В} = A_{Р} + C_{З} + C_{ЗР} + C_{К} \text{ (грн.)}, \quad (4.11)$$

$$C_{В} = 160\,365,09 + 12623,6 + 31492,8 + 3936,6 = 208\,418,09 \text{ (грн.)}$$

### 4.3 Розрахунок терміну окупності

Результати розрахунків проведених у другому розділі по виробітку сонячної енергії трекінговою СЕС зведені в таблиці 4,5.

Таблиця 4.5 – Кількість виробленої електроенергії сонячною станцією по місяцях

Місяць	Вироблено енергії, кВт*год
Січень	2 938,71
Лютий	4 897,86
Березень	8 163,09
Місяць	Вироблено енергії, кВт*год
Квітень	12 407,90
Травень	16554,76
Червень	16979,24
Липень	16652,71
Серпень	14367,05
Вересень	10448,76
Жовтень	6530,48
Листопад	3265,24
Грудень	2 938,71
Генерація за рік	113 205,80

Ціна виробленої електроенергії

$$C_{\text{вел}} = W_{\text{річн.}} \cdot C_{\text{ел.}}, \quad (4.12)$$

де  $W_{\text{річ}}$  – вироблена виробленої електроенергії сонячною станцією;

$C_{\text{ел}}$  – ціна електроенергії для підприємств (непобутових споживачів) в Україні

$$Ц_{вел} = 113\,205,80 \cdot 7,1 = 803\,761,18 \text{ (грн.)}$$

Термін окупності розраховуємо за виразом:

$$T_{OK} = \frac{C_{\Sigma} + C_{DM} + C_B}{Ц_{вел} - C_B} \quad (4.13)$$

$$T_{OK} = \frac{3\,944\,981,351 + 416\,949,25 + 320\,730,191}{803\,761,18 - 208\,418,09} = \frac{4\,682\,660,792}{595\,343,09} = 7,8 \text{ (роки)}$$

Підсумовуючи результати розрахунків, можна зробити висновок, що розроблена електромеханічна система керування сонячної фотоелектричної станції, з урахуванням усіх витрат на її впровадження, монтаж та налаштування, забезпечує повну окупність інвестицій протягом приблизно 7,8 року. Такий показник досягається завдяки ефективному використанню природного потенціалу сонячної енергії, електромеханічна система керування, що оптимізує енергетичні потреби підприємства.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі розглянуто питання охорони праці, що стосуються монтажу та експлуатації сонячної фотоелектричної станції. Аварії в електричних мережах, а також недотримання правил з їх безпечної експлуатації призводять до серйозної загрози життю та здоров'ю людей через небезпеку падінь з висоти, поранень, опіку, уражень електричним струмом тощо. Крім того, на електротехнічний оперативний персонал, що здійснює монтаж і експлуатацію системи керування сонячної фотоелектричної станції, впливають такі шкідливі виробничі фактори [25,26]:

1) фізичні фактори:

- мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання);
- виробничий шум: ультразвук, інфразвук;
- вібрація (локальна, загальна);
- освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо);

2) хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил);

3) фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

## **5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта**

### **5.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць**

Під час монтажу та експлуатації системи керування сонячної фотоелектричної станції, для убезпечення працівників, що їх проводять в колах вимірювальних приладів і пристроїв релейного захисту, всі вторинні обмотки вимірювальних трансформаторів струму і напруги потрібно постійно заземлювати. За необхідності розриву кола струму вимірювальних приладів і реле кола вторинної обмотки трансформатора струму попередньо закорочується на спеціально призначених для цього затискачах.

Розривати кола, підключені до вторинної обмотки трансформатора струму, забороняється. За необхідності розриву цих кіл вони мають бути попередньо замкнуті перемичкою, встановленою до передбачуваного місця розриву (рахуючи від трансформатора струму). Під час встановлення перемички слід застосовувати інструмент з ізолювальними рукоятками.

Під час роботи на трансформаторах струму або в колах, підключених до їх вторинних обмоток, слід виконувати такі заходи безпеки: затискачі вторинних обмоток до закінчення монтажу кіл, що до них підключаються, мають бути замкнені накоротко. Після приєднання змонтованих кіл до трансформатора струму закоротку слід переносити на найближчу збірку затискачів і знімати тільки після повного закінчення монтажу та перевірки правильності приєднання змонтованих кіл; під час перевірки полярності до подавання імпульсів струму в первинну обмотку прилади слід приєднувати до затискачів вторинної обмотки. Забороняється використовувати шини первинних обмоток як струмопровідні під час монтажних та зварювальних робіт.

Під час перевірки кіл вимірювання, сигналізації, керування і захисту за необхідності в приміщенні електроустановок напругою понад 1000 В дозволяється залишатися одному члену бригади за умовами роботи (зокрема, регулювання вимикачів, перевірка ізоляції); працівник, який перебуває окремо

від керівника робіт, повинен мати групу III. Під час робіт в колах трансформаторів напруги з подачею напруги від стороннього джерела знімаються запобіжники з боку вищої і нижчої напруги, а також відключаються автомати від вторинних обмоток.

Записувати покази вимірювальних приладів, встановлених на щитах керування і в РУ, дозволяється: одноособово працівникам з групою II за наявності місцевих оперативних працівників (з чергуванням двох осіб) і з групою III – без місцевих оперативних працівників; працівникам інших організацій з групою III у супроводі місцевого оперативного працівника.

Встановлення та зняття вимірювальних приладів, підключених до вимірювальних трансформаторів, повинні проводити за нарядом зі зняттям напруги два працівники, один з яких повинен мати групу IV, а другий – групу III. Приєднання вимірювальних приладів, встановлення і зняття електрорічильників, підключених до вимірювальних трансформаторів, за наявності випробувальних блоків або спеціальних затискачів, що дають змогу безпечно закорочувати кола струму, виконуються без зняття навантаження і напруги.

До робіт, які виконуються без зняття напруги на струмопровідних частинах та поблизу них, належать роботи, що проводяться безпосередньо на цих частинах. Роботи без зняття напруги на струмопровідних частинах та поблизу них слід виконувати не менше як двом працівникам, з яких керівник робіт повинен мати групу IV, інші – групу III. Роботою без зняття напруги віддалік від струмопровідних частин, що перебувають під напругою, вважається робота, під час якої є неможливим випадкове наближення працівників і ремонтного оснащення та інструменту, що застосовуються ними, до струмопровідних частин на відстань, меншу від допустимих, проведення технічних або організаційних заходів для запобігання такому наближенню не потрібно.

Під час роботи в електроустановках напругою до 1000 В без зняття напруги на струмопровідних частинах чи поблизу від них необхідно: обгородити розташовані поблизу робочого місця інші струмопровідні частини, що перебувають під напругою, і до яких можливі випадковий дотик; працювати в діелектричному взутті чи стоячи на ізолювальній підставці або на діелектричному килимі; застосовувати інструмент із ізолювальними руків'ями (у викруток, крім того, має бути ізольований стрижень); за відсутності такого інструменту слід користуватися діелектричними рукавичками.

Під час виконання робіт без зняття напруги на струмопровідних частинах за допомогою ізолювальних засобів захисту необхідно: тримати ізолювальні частини засобів захисту за руків'я до обмежувального кільця; розміщувати ізолювальні частини засобів захисту так, щоб не виникла небезпека перекриття по поверхні ізоляції між струмопровідними частинами двох фаз чи замикання на землю; користуватися тільки сухими і чистими ізолювальними частинами засобів захисту з непошкодженим лаковим покриттям. В разі виявленні порушень лакового покриття чи інших несправностей ізолювальних частин засобів захисту, користування ними забороняється.

В процесі роботи із застосуванням електрозахисних засобів (ізолювальні штанги та кліщі, електровимірювальні кліщі, покажчики напруги) допускається наближення працівника до струмопровідних частин на відстань, яка визначається довжиною ізолювальної частини цих засобів. Без застосування електрозахисних засобів забороняється торкатися ізоляторів електроустановки, що перебуває під напругою.

В електроустановках забороняється працювати у зігнутому стані, якщо в разі випрямлення відстань до струмопровідних частин буде меншою від допустимих. В процесі виконання робіт біля необгороджених

струмопровідних частин забороняється розташовуватися таким чином, щоб ці частини знаходилися позаду чи з двох боків.

### **5.1.2 Електробезпека**

Живлення силового обладнання та системи освітлення здійснюється від п/ст 10/0,4 кВ кабельними лініями, що прокладені в траншеях. Для живлення використовується трифазна чотирьохпровідна мережа із заземленою нейтраллю напругою 380/220 В. Відповідно з ГОСТ ПБЕ [27,28] умови праці за ступенем небезпеки ураження працівників електричним струмом є умовами з підвищеною небезпекою, тому що підлога у приміщеннях, що будуються, є струмопровідною.

Загальні вимоги безпеки до виробничого обладнання встановлені згідно з ГОСТ 12.2.003, в якому визначені вимоги до основних елементів конструкції, органів управління і засобів захисту, які входять в конструкцію виробничого обладнання любого виду і призначення. Електропривід насосів, вентиляторів, іншого обладнання повинний бути виконаний відповідно до Правил устрою електричних установок.

Обов'язкова установка захисного заземлення та захисного відключення. При роботі з електроустановками використовуються основні і додаткові електрозахисні засоби. До основних відносяться: ізолюючі штанги; ізолюючі і струмовимірювальні кліщі; слюсарно-монтажні інструменти з ізолюючим руків'ям. До додаткових відносяться: діелектричні рукавички; переносне заземлення; огорожуючі пристосування; плакати та знаки безпеки.

## **5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії**

### **5.2.1 Мікроклімат**

Основними нормативними документами, що регламентують параметри мікроклімату виробничих приміщень, є ДСН 3.3.6.042-99 [30]. Допустимі норми температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочій

зоні виробничих приміщень наведені в таблиці 5.1. Робота з монтажу та експлуатації системи керування вітроенергетичної установки відноситься до категорії Пб по важкості праці.

Таблиця 5.1 – Допустимі норми параметрів повітря на непостійних робочих місцях

Період року	Категорія робіт	Температура, °С	Відносна вологість	Швидкість руху, X
Холодний	Пб	13-23	75	не більше 0,4
Теплий		15-29	70 при 25 °С	0,2-0,5

### 5.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується гранично допустимими концентраціями (ГДК) в мг/м<sup>3</sup> [6].

Під час монтажу системи керування виділяється пил нетоксичний. При роботі системи вентиляції, провітрюванні у приміщенні може попадати пил та інші шкідливі речовини, які виділяються при технологічних процесах в цеху і знаходяться повітрі навколишнього середовища. Їх ГДК відповідно до [30] наведено в таблиці 6.2.

Для забезпечення допустимих показників мікроклімату та складу повітря робочої зони відповідно до ДБН проектом передбачені наступні рішення [31]: застосування пиловідсмоктуючих агрегатів з рукавними фільтрами, які встановленні безпосередньо на дільницях біля обладнання із яких очищене повітря поступає у виробниче приміщення; необхідно здійснювати контроль за ГДК шкідливих речовин у приміщенні; застосовувати природну вентиляцію: організовану та неорганізовану.

Таблиця 5.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин для повітря атмосфери в робочій зоні монтажника

Назва речовини	ГДК, мг/м <sup>3</sup>		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

### 5.2.3 Виробниче освітлення

Для забезпечення найбільш сприятливих умов зорової праці нормують мінімальну освітленість на найбільш темній ділянці робочої поверхні. Рівень аварійного освітлення складає 15% освітленості основної роботи. Приміщення забезпечене природним освітленням в денний проміжок часу, але вечери постає проблема в штучному освітленні.

Характеристика зорових робіт – середньої точності. Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [32] розряд зорової роботи IV, підрозряд «г». Нормовані значення освітленості наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Характер зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0 включно	IV	г	середній	світлий	-	200	4	2,4

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітленням, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 4,5 метра.

При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

#### **5.2.4 Виробничий шум**

Під час монтажу системи керування джерелом шуму є будівельне обладнання, машини, механізми та переносний електроінструмент – механічний шум. При санітарно-гігієнічному нормуванні шуму використовують два методи: нормування за гранично допустимим спектром шуму; нормування рівня звуку за шкалою А шумоміра. За характером спектру шум – широкосмуговий з безперервний спектром шириною більше октави; за тональною характеристикою – постійний; за походженням – гідродинамічний.

Допустимі рівні звукового тиску, рівні звуку і еквівалентні рівні звуку на робочих місцях приймаються за вимогами ДСН 32.23-85 [33] і наведені в таблиці 5.4.

Для зменшення рівня шуму до допустимого в цеху двигуни виконуються в металевому кожусі, а також виконують змащення, застосовують пластмасові деталі, використовують протишумні навушники, які закривають вушну раковину.

Таблиця 5.4 – Допустимі рівні звукового тиску

Робоче місце	Рівні звукового тиску в октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц									Рівні звукового тиску, ДБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
На постійних робочих місцях у виробничих приміщеннях та на території підприємства	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80

### 5.2.5 Виробничі вібрації

Допустимі рівні загальної вібрації на робочих місцях приймаються за вимогами ДСН 32.23-85 [34] і наведені в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Допустимі рівні вібрації на постійних місцях

Вид вібрації	Октавні смуги з середньгеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000
Загальна вібрація на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях	<u>1,3</u> 108	<u>0,45</u> 99	<u>0,22</u> 93	<u>0,2</u> 92	<u>0,2</u> 92	<u>0,2</u> 92	-	-	-	-

В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації, м/с 10-2, знаменнику - логарифмічні рівні вібрації, дБ.

Основними методами колективного віброзахисту є зниження вібрації шляхом дії на джерело виникнення: відстрочка від режиму резонанс;

динамічне гасіння коливань, заміна конструктивних елементів уставок і будівельних конструкцій. Засоби індивідуального захисту діляться на засоби для ніг, рук та тіла працюючого.

### **5.3 Пожежна безпека**

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують Правила пожежної безпеки в Україні . Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів визначається за ДСТУ 8829: 2019 , за якою визначається категорія приміщень за вибуховою та пожежною безпекою .

Отже, приміщення підстанцій, до яких підключається сонячна фотоелектрична станція, вибухонебезпечною та пожежонебезпечною відноситься до категорії Д –речовини і матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилу і волокон), а також негорючі речовини і матеріали в холодному стані (за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються) зазначені вище речовини і матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В; з зонами П-III (місця, де зберігаються тверді горючі речовини).

Пожежо-вибухонебезпечність речовин і матеріалів – сукупність властивостей, що характеризують їхню здатність до виникнення і поширення горіння. Наслідком горіння, залежно від його швидкості та умов протікання, можуть бути пожежа або вибух. Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів визначають показниками, вибір яких залежить від агрегатного стану речовини (матеріалу), та умов їхнього застосування.

Будівля, в якій розташовані ці приміщення, характеризується II ступенем вогнестійкості.

До II ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону із застосуванням листових і плитних

негорючих матеріалів. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2016 наведено в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості і будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площадки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	пере-криття між поверхові (у т.ч. горищні та над підвалами)	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зовнішні не-несучі	внутрішні не-несучі (перегородки)				пли-ти, насти-ли, прого-ни	балки, ферми, арки, рами
II	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M0	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M0	RE 15 M0	R 30 M0

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2016 наведено в таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи протипожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбуру-шлюзу, не нижче
Стіни	3	REI 45	2	2
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекрыття	4	REI 15	3	2

Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами

слід приймати за таблицею 4.8 (чисельник). В умовах забудови, що склалася, протипожежні відстані між житловими будинками та від житлових будинків до будівель і споруд іншого призначення слід визначати згідно з протипожежними вимогами даних норм, наведеними у таблиці 4.8. Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських будинків і споруд слід приймати за таблицею 5.8 (знаменник) .

Таблиця 5.8 – Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будинків, будівель і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IIIa, IIIб, IV, IVa, V
II	6/9	8/9	10/12

На території кожної підстанції встановлюється по 15 вогнегасників ВП-5 (ВВП-5) .

## ВИСНОВКИ

Електрична енергія є невід'ємним ресурсом, однак її традиційне виробництво характеризується екологічною обтяжливістю та високою вартістю. Це стимулює інтенсифікацію розвитку альтернативних джерел енергії, зокрема сонячної, котра є стратегічно пріоритетним напрямком для України. У контексті зростання цін на електроенергію та нестабільності енергетичної мережі, промислові підприємства, такі як ТОВ «Вінницька птахофабрика», активно інтегрують фотоелектричні системи з метою досягнення енергетичної автономії та значної фінансової оптимізації. Проте подальша модернізація цих сонячних електростанцій, що включає застосування інноваційних електромеханічних систем керування фотоелектричними установками, надасть можливість максимально ефективно використовувати сонячну енергію, значно підвищити енергоефективність та зміцнити курс на використання відновлюваних джерел енергії.

Запропонована електромеханічна система керування сонячною фотоелектричною станцією, що містить інтегрований проактивний механізм на базі ML-прогнозування, являє собою високоефективне та економічно доцільне інженерне рішення. Ця система забезпечує суттєве збільшення енергетичної продуктивності фотоелектричних систем порівняно з конвенційними статичними конфігураціями, оскільки застосування двовісного трекінгу в поєднанні з інтелектуальними алгоритмами управління дозволяє досягти приросту річного виробітку електроенергії на 30–40% від її потенційної потужності.

Розрахунки які були здійснені, підтверджують високу результативність системи, прогнозуючи річне вироблення електроенергії у розмірі 113 205,80 кВт·год для масиву площею 60 м<sup>2</sup>.

Основне вдосконалення полягає у зміні парадигми від неточного реактивного LDR-відстеження, яке є чутливим до атмосферних явищ, таких як

хмарність і відблиски, та схильне до перманентних коливань, до проактивного керування. Останнє реалізується за допомогою моделей машинного навчання (наприклад, LSTM або Random Forest) для оптимального налаштування кута нахилу панелей, спираючись на прогнози погодних умов та хмарності. Зазначений механізм не лише оптимізує збір розсіяного сонячного випромінювання, а й сприяє зменшенню експлуатаційних витрат та подовженню терміну служби приводних механізмів шляхом мінімізації зайвих переміщень. Відповідно до представленого техніко-економічного обґрунтування, висока ефективність даної системи підтверджується відносно коротким терміном окупності (7,8 року), що засвідчує раціональність її імплементації на індустріальних об'єктах з метою забезпечення енергетичної незалежності та суттєвої фінансової вигоди.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бомбик В.С. Електромеханічна система керування сонячної фотоелектричної станції [Електронний ресурс] / В. С. Бомбик, А. В. Коритний // Матеріали VI міжнародної науково-технічної конференції Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2025), Вінниця, 22-23 жовтня 2025 р. – Електрон. текст. дані. – 2025. – Режим доступу: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/924/1612/2930-1>
2. ТОВ Вінницька птахофабрика – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://latifundist.com/kompanii/1416-vinnitskaya-ptitsefabrika>
3. Система керування [Електронний ресурс] Режим доступу: [https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/project-ideas/Energy\\_p045/energy-power/solar-tracker](https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/project-ideas/Energy_p045/energy-power/solar-tracker)
4. Laouafi, F., Improved grey wolf optimizer for optimal reactive power dispatch with integration of wind and solar energy. *Electrical Engineering & Electromechanics, KhPI.* – 2025
5. Roth P., Georgiev A., Boudinov H.. Cheap two-axis sun following device. *Energy Conversion and Management* 2005;46:1179–92
6. Software [Електронний ресурс] // PVsyst. Photovoltaic software - Режим доступу: <http://www.pvsyst.com/en/software>
7. NASA Prediction of Worldwide Energy Resource [Електронний ресурс] // NASA - POWER - Режим доступу: <https://power.larc.nasa.gov>
8. Trina Solar TSM-NEG21C.20 710W [Електронний ресурс] <https://sun-energy.com.ua/solar-power/solar-panels/tsm-neg21c-20-710w>
9. Tomson T.. Discrete two-positional tracking of solar collectors. *Renewable Energy* 2008;33:400–5.
10. Mamlook R., Nijmeh S., Abdallah S.M.. A programmable logic controller to control two axis sun tracking system. *Information Technology Journal* 2006;5(6):1083–7.

11. Markvart T.. Solar electricity, 2nd ed., New York: John Wiley and Sons Inc.; 1996.
12. Khlaichom P., Sonthipermpoon K.. Optimization of solar tracking system based on genetic algorithms; 2006.
13. Walraven R.. Calculating the position of the sun. Solar Energy 1977;20:393
14. Roth P., Georgiev A., Boudinov H.. Cheap two-axis sun following device. Energy Conversion and Management 2005;46:1179–92.
15. California Institute of Technology. Basic research needs for solar energy utilization. Report of the basic energy sciences workshop on solar energy utilization; April 18–21, 2005.
16. Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ua.energy>
17. Українська сонячна енергетика: як не повторити долю Ікара [Електронний ресурс] – Доступ: <https://www.epravda.com.ua/rus/publications/2019/02/15/645301>
18. В. Коваль. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / Р. Івасечко, К. Козак // Энергосбережения. – 2015. – випуск 134.
19. H.Mousazadeh. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output / A. Keyhani, A. Javadi, H. Mobli, K. Abrinia// Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. – pp.1800– 1806
20. S. Mansour. Optimum Design Of On Grid Pv System Using Tracking System / D.W.R.Anis, D.I.M. Hafez // Sci. Technol. Res. – 2015. – №05. – pp. 50–57.
21. Одноосні трекеři [Електронний ресурс]. Доступ: <http://ussolar.com.ua/ua/news/6-odnoosnye-trekery-povyshayuteffektivnostsolnechn oystantsii-na-15-17>.

22. Сонячний трекер, система слідування за сонцем[Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://greenchip.com.ua/26-0-0-.html>
23. С. Sungur. Multi-axes sun-tracking system with PLC control for photovoltaic panels in Turkey // Renewable Energy – 2009 – vol. 34 – pp. 1119-1125.
24. А. Al-Mohamad. Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a Suntracking system // Applied Energy – 2004 – vol. 79 – pp. 345-354.
25. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.
26. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.
27. НПАОП 40.1-1.21-98 (ДНАОП 0.00-1.21-98) Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=48644](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=48644).
28. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.
29. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.
30. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.
31. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.

32. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=79885](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885)

33. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.

34. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.

35. Що таке мікрокомп'ютери? Розповідаємо на прикладі Raspberry Pi [Електронний ресурс] // - Режим доступу: [https://e-server.com.ua/uk/poradi/shho-take-mikrokompiuteri-rozpovidajemo-na-prikladi-raspberry-pi?srsltid=AfmBOorufUHR6Qkpm4bwnhruGXHBhOZYQ4qz3\\_h9IDFzLjcBMFs9ZJc](https://e-server.com.ua/uk/poradi/shho-take-mikrokompiuteri-rozpovidajemo-na-prikladi-raspberry-pi?srsltid=AfmBOorufUHR6Qkpm4bwnhruGXHBhOZYQ4qz3_h9IDFzLjcBMFs9ZJc)

## Додаток А

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри КЕМСК

к.т.н., доц.

Микола МОШНОРИЗ

« 21 » 10 2025р.

## ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на магістерську кваліфікаційну роботу

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ  
СТАНЦІЇ

08-24.МКР.005.00.000 ТЗ

Виконав: ст. гр. ЕПА-24м

Андрій КОРИТНИЙ

« 21 » 10 2025р.

Керівник роботи к.т.н., ст.викл.

Вадим БОМБИК

« 21 » 10 2025р.

## **1 Загальні відомості**

Повне найменування розробки – «Електромеханічна система керування сонячної фотоелектричної станції»

## **2 Підстави для розробки**

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем бакалаврських дипломних робіт.

## **3 Призначення розробки і галузь використання**

Електромеханічна система керування сонячної фотоелектричної станції в умовах товариства з обмеженою відповідальністю «Вінницька птахофабрика».

## **4 Вимоги до розробки**

Система повинна забезпечувати автоматичне орієнтування сонячних панелей перпендикулярно до сонячних променів у двох площинах. Забезпечення приросту річної генерації енергії на рівні 30-40% порівняно зі стаціонарними системами

## **5 Комплектація розробки**

Електромеханічна система керування сонячної фотоелектричної станції містить: сонячні панелі; інвертор; сонячний трекер. електромеханічну систему керування.

## **6 Технічні характеристики**

Для даної сонячної фотоелектричної станції необхідно вибрати умови оптимального приєднання до існуючої мережі.

## **7 Джерела розробки**

1. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.

2. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.

3. НПАОП 40.1-1.21-98 (ДНАОП 0.00-1.21-98) Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=48644](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=48644).

4. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

5. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.

6. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.

7. УЕ-2017 Правила улаштування електроустановок

## **8 Елементна база**

Сонячні панелі, інвертор, кабель, система керування сонячним трекером

## **9 Конструктивне виконання**

Рухома частина станції виконана у вигляді опорної металоконструкції з можливістю обертання навколо вертикальної осі та зміни кута нахилу рами з фотомодулями. Система керування розміщена у захищеній шафі з класом захисту не нижче IP54.

## **10 Технічне обслуговування і ремонт**

Технічне обслуговування і ремонт електромеханічної системи здійснюється кваліфікованими інженерами КПіА ТОВ «Вінницька птахофабрика».

## **11 Порядок контролю та прийняття**

Виконання етапів графічної та розрахункової документації магістерської кваліфікаційної роботи контролюється керівником згідно з графіком виконання роботи.

**Додаток Б**  
**(обов'язковий)**

**ГРАФІЧНА ЧАСТИНА**

**«ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЇ  
ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ»**

# ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ

Розробив: ст. гр. ЕПА-24м

Андрій КОРИТНИЙ

Керівник: к.т.н., ст. викл. Вадим БОМБИК

## МЕТА, ОБ'ЄКТ, ПРЕДМЕТ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

**Актуальність теми.** Фотоелектричні станції покривають значну частину енергетичних потреб підприємств, але звичайні нерухомі сонячні панелі ефективні лише короткий проміжок часу. Через зміну кута падіння променів втрачається до 35% потенційної потужності. Тому використання систем стеження за сонцем викликає все більший інтерес, так як дає змогу отримувати більше електричної енергії у порівнянні з стаціонарним виконанням. Тому тема роботи є актуальною.

**Метою роботи** Розробка та впровадження електромеханічної системи керування для сонячної фотоелектричної станції (ФЕС) з метою максимізації виробітку електроенергії для покриття потреб підприємства.

**Об'єкт дослідження** – процес керування положенням сонячних панелей відносно сонця за допомогою електромеханічної системи керування.

**Предмет дослідження** – метод визначення положення сонячних панелей відносно сонця за допомогою машинного навчання та засобів прогнозування на основі історичних даних.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати наступні задачі:

1. Зробити аналіз існуючих електромеханічних системи керування сонячної фотоелектричної станції.
2. Розробити схему електричну принципіву системи керування сонячної фотоелектричної станції.
3. Розробити алгоритм роботи пристрою відсліковування положення сонця .
4. Провести техніко-економічне обґрунтування для впровадження електромеханічної системи стеження та визначити термін окупності.
5. Розробити заходи з охорони праці, пов'язані з експлуатацією системи стеження за сонцем.

### Проблематика стаціонарних систем:

- Звичайні нерухомі СЕС ефективні лише в короткий проміжок часу коли промені падають перпендикулярно.
- Через постійну зміну кута падіння променів протягом дня та сезону стаціонарні установки втрачають до **35%** можливого виробництва енергії.
- Графік втрат енергії показує пряму залежність від відхилення кута падіння: чим більший кут, тим менша потужність

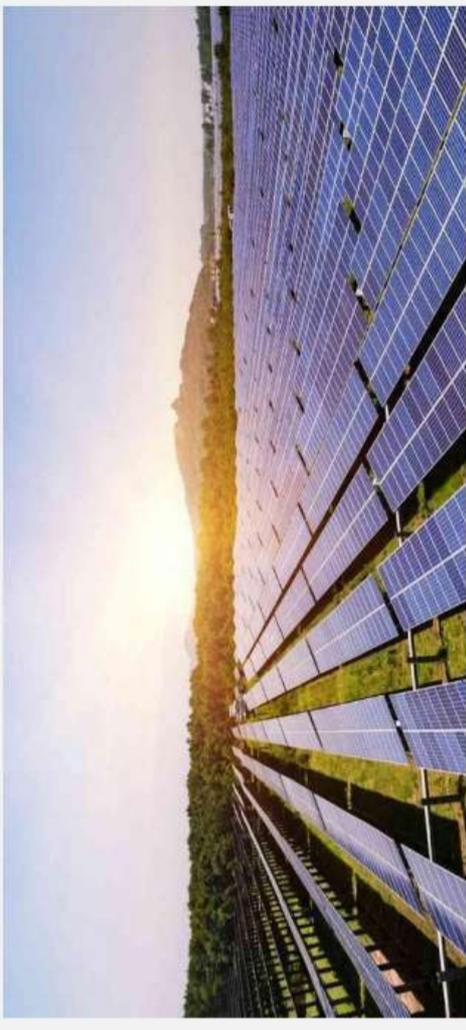


Рисунок 1 Наземна стаціонарна СЕС.

### Обґрунтування та переваги трекінгу:

- Розрахунки енергії на одиницю площі показують, що система ідеального стеження теоретично забезпечує на **57%** більше енергії порівняно зі статичною установкою.
- Це досягається завдяки підтримці панелі перпендикулярно до сонячних променів протягом усього світлового дня.
- У реальних умовах (з урахуванням атмосфери) річний приріст генерації від використання трекерів становить 30–40%
- Вертикально-осьовий трекер збільшує генерацію на ~18%.
- Двовісний трекер збільшує генерацію на ~30% і більше



Рисунку 2 Наземна рухома СЕС.

## АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ВИБІР КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМИ

Для розробки було прийнято використовувати Двовісний трекер. Який забезпечує найвищу ефективність (+30-40% до генерації) завдяки відстеженню Сонця по азимуту (схід-захід) та куту над горизонтом.

Трекер розраховано на масив площею до 60 м<sup>2</sup>, що дозволяє розмістити близько 30-31 сонячної панелі на одній рухомій платформі.

Для забезпечення руху платформи обрано спеціалізовані привода Nanning, які відрізняються надійністю та точністю позиціонування.

Для генерації електричної енергії було прийнято використовувати обладнання відомих і провірених часом виробників:

- Фотомодулі Trina Solar TSM-NEG21C.20 710W
- Інвертор Huawei SUN2000-100KTL-M2.

За керування системи відповідає набір датчиків та плату керування Arduino UNO

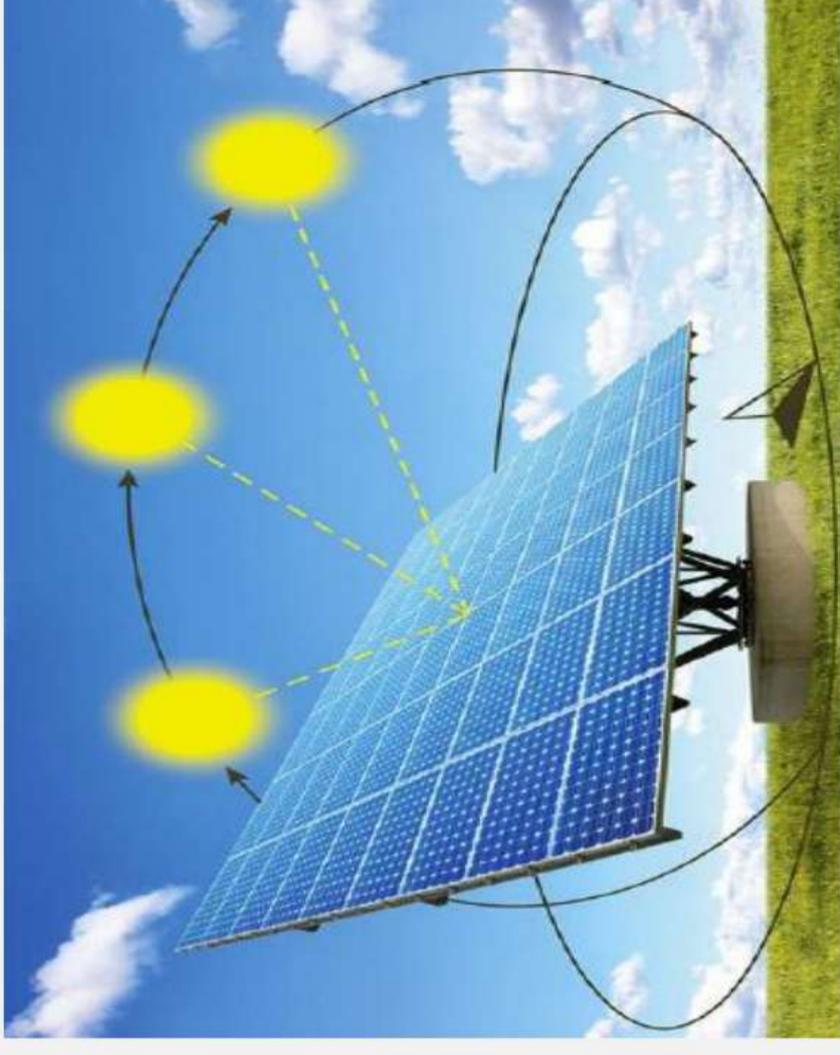


Рисунок 3 Двовісний сонячний трекер

# ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОЄКТУВАННЯ



Таблиця 1 - Основні параметри приводу SL 95 Solar

Параметр	Значення
Виробник	Hanning Elektro-Werke
Модель	SL 95 Solar
Тип пристрою	Лінійний актуатор
Номінальна потужність	~450 Вт
Напруга живлення	36V DC
Динамічне зусилля	15 000 Н
Статичне навантаження	45 000 Н
Швидкість руху	0 – 7.5 мм/с
Максимальна швидкість	до 50 мм/с
Хід штока (Stroke)	500 – 1000 мм
Клас захисту	IP66 (або IP55)
Робоча температура	-25°C ... +60°C
Особливості	Самогальмування

Рисунок 4. Привід SL 95 Solar

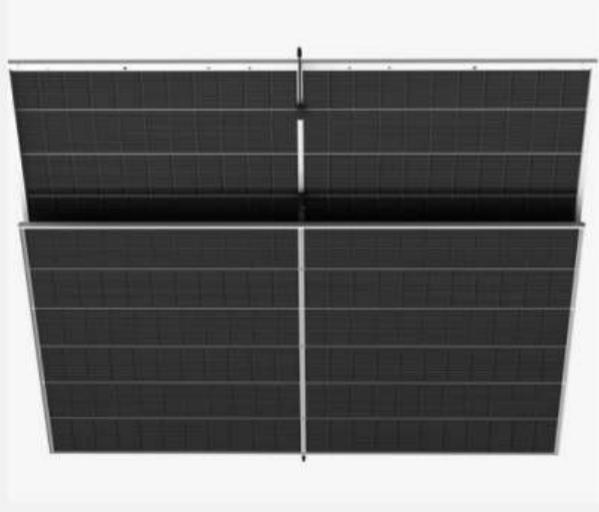
Таблиця 2 - Основні параметри приводу Hanning HFG-L Solar



Рисунок 5. Привід HFG-L Solar

Параметр	Значення / Опис
Тип обладнання	Мотор-редуктор
Призначення	Азимутальний поворот (горизонтальна вісь, «схід-захід»)
Номінальна потужність	360 Вт (0,36 кВт)
Напруга живлення	3~400V / 230V AC
Номінальний струм	~1.1 А (при 400В) / ~1.9 А (при 230В)
Швидкість обертання (вихідна)	Дуже низька, < 1 об/хв (для точного позиціонування)
Крутний момент	Високий (самогальмівний, утримує трекер при вітрі)
Клас захисту	IP54 / IP55
Охолодження	Природне (без вентилятора, закритий корпус)

# ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОЄКТУВАННЯ



Таблиця 1 - Основні параметри сонячних панелей типу Trina Solar TSM-NEG21C.20 710W

Тип кристалу	Монокристал, 210·х·210·мм
Максимальна потужність	710·Вт
Напруга при максимальній потужності	40,90·В
Струм при максимальній потужності	17,36·А
Напруга холодого ходу	49,00·В
Струм короткого замикання	18,40·А
ККД	22,9%
Робоча температура	-40°С...+85°С
Габаритні розміри	2384*1303*33мм

Рисунок 6. Фотомодулі TSM 710W Вт.

Таблиця 2 - Основні параметри інвертора Huawei типу SUN2000-100KTL-M2



Рисунок 7. Інвертор Huawei типу SUN2000-100KTL-M2

№ з/п	Найменування показника	Показник
1	Робочий діапазон МРРТ, Вт	200...1000
2	Максимальний струм на кожен МРРТ, А	22
3	Кількість МРРТ трекерів	10/2
4	Максимальний струм МРРТ трекера, А	20- на 1 стріні
5	Номінальна потужність, кВт	100
6	Максимальна потужність, кВт	100
7	Номінальна напруга, В	1100
8	Номінальна частота, Гц	50/60
9	Вихідна напруга, В	380/400/480
10	Максимальний К.К.Д	98,6%

# АПАРАТНА ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МАКЕТУ СИСТЕМИ (ПРОТОТИП)

- **Мікроконтролер: Arduino UNO** (на базі чіпа ATmega328P). Обрано як оптимальне рішення для прототипування завдяки доступності та достатній кількості аналогових входів (A0–A5) для підключення сенсорів.
- **Сенсорна підсистема:** Використано **4 фоторезистори (LDR)**, розміщених попарно (Верх-Низ, Ліво-Право). Вони змінюють свій опір залежно від інтенсивності світлового потоку.
- **Виконавчі механізми (Сервоприводи):** Два сервомотори (Horizontal та Vertical) для імітації руху двовісного трекара
- **Логіка базового алгоритму (Software):** Програма (C++) реалізує метод **реактивного відстеження** за різницею освітленості:
- **Зчитування даних:** Контролер безперервно опитує 4 аналогові входи (змінні `ldrL`, `ldrR`, `ldrLd`, `ldrRd`).
- **Обробка:** Обчислюються середні значення освітленості для кожної сторони:
- Якщо різниця між сторонами перевищує заданий поріг чутливості контролер подає команду на поворот сервоприводу на  $1^\circ$  у бік більшої освітленості.
- **Результат:** Система прагне досягти стану рівноваги, коли всі датчики освітлені рівномірно (тобто панель спрямована точно на джерело світла).

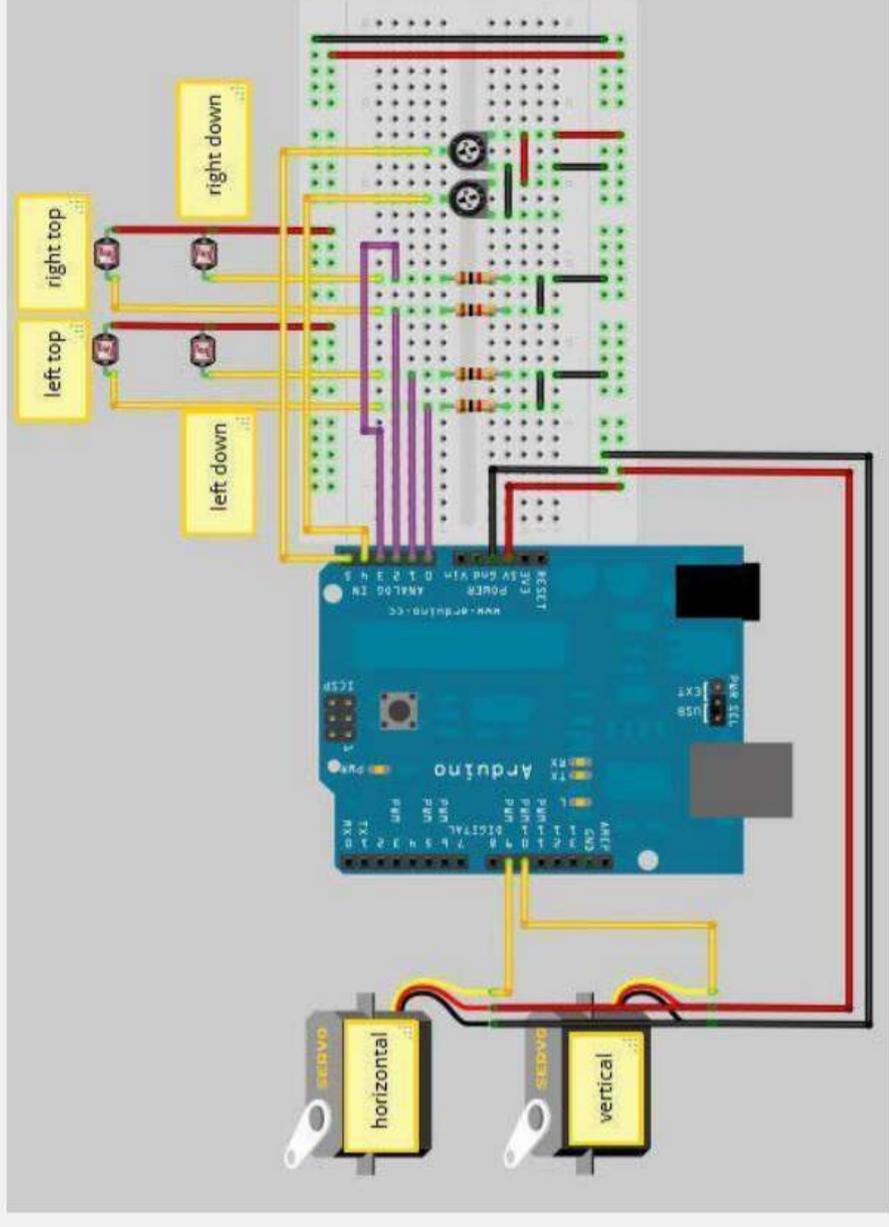


Рисунок 2.5 – Макетна схема підключення  
КОМПОНЕНТІВ

# ПЕРЕХІД ДО ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ПРОАКТИВНОГО КЕРУВАННЯ

Перехід від реактивного керування (слідування за найяскравішою точкою "тут і зараз") на користь інтелектуального проактивного керування (передбачення оптимального положення наперед). Що вирішує головні проблеми LDR-трекерів: хаотичний рух при мінливій хмарності та помилкові спрацювання на відблиски.

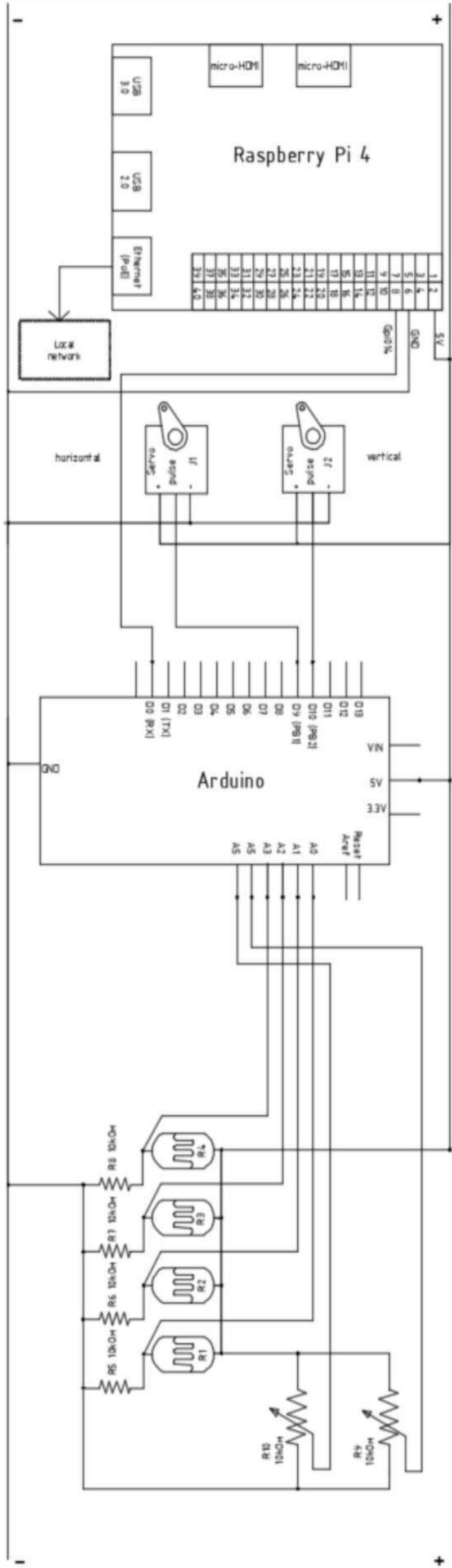
Проактивне керування включає в себе дворівневу архітектуру:

- Рівень обчислень: Одноплатний комп'ютер Raspberry Pi (або ПК) запускає ML-модель (LSTM/Random Forest) та розраховує кути.
- Рівень виконання: Arduino Uno отримує готові координати через Serial-порт і керує приводами

Таблиця 5 Переваги проактивної системи над реактивною системою

Проблематика базового (реактивного) методу (LDR)	
Вразливість до погоди	Система на фоторезисторах «губиться» при хмарності, коли світло розсіяне рівномірно, або реагує на яскраві хмари замість Сонця
Обмеженість:	Відсутність нічного режиму та неможливість оптимізації під розсіяне світло
Переваги проактивного керування на базі Machine Learning (ML)	
Стратегія поведінки	<i>Ясно:</i> Слідування за астрономічним рухом Сонця. <i>Хмарно:</i> Перехід у горизонтальне положення (або інший оптимальний кут) для максимального захоплення розсіяного випромінювання, що неможливо для звичайних датчиків
Енергоефективність	Оновлення позиції відбувається дискретно (наприклад, раз на 5-15 хв), що прибирає постійне «дрижання» сервоприводів та економить ресурс механіки
Резервування:	DR-датчики залишаються в системі, але виконують роль запобіжника (перевірка настання ночі або аварійна робота при втраті зв'язку з сервером)

# ОДНОЛІНІЙНА СХЕМА ПІДПРИЄМСТВА ІЗ ВСТАНОВЛЕНИМ ОБЛАДНАННЯМ



08-24.МКР.005.00.000

Зм.	Кіль.	Лист	№ док.	Підпис	Дата	Електромеханічна система керування сонячної фотоелектричної станції	Літ.	Маса	Масштаб
Розробив		Коритний А.В.							
Перевірів		Бомбик В.С.							
Т. контр.						Стадія	Аркушів		
Н.контр		Бомбик В.С.				ВНТУ, гр. ЕПА-24м			
Затвердив		Мошноріз М.М.							

# АЛГОРИТМ РОБОТИ МОДЕРНІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

Для реалізації модифіковано принципу керування електромеханічною системою керування сонячної фотоелектричної станції повинні виконуватись наступні кроки які в свою чергу утворюють алгоритм.

- Етап I: Збір даних та Прогнозування (Host-система):
  - Вхідні дані; Система збирає актуальні метеодані та історичні дані генерації СЕС
  - ML-обробка; аналіз даних та формування прогнозу оптимального положення.
  - Корекція на хмарність; розраховується кут для максимального захоплення розсіяного світла
  - Етап II: Форматування та передача команд:
    - Формування команди : `Raspberry Pi/PK` , Та передача сигналу виконавчі системі;
    - Етап III: Виконання та Позиціонування
      - Аналіз Контролер зчитує вхідний рядок
      - Фізичний рух: `Arduino` подає керуючі сигнали
      - Режим очікування: система переходить у пасивний стан до отримання наступної команди.
    - Етап IV: Контроль безпеки та Резервування
      - Перевірка темряви: Якщо `LDR`-датчики фіксують настання ночі, система ігнорує зовнішні команди та переводить панель у режим "паркування "
    - Втрага зв'язку: У разі відсутності даних від `Host`-системи протягом заданого часу, `Arduino` автоматично перемикається на резервний алгоритм керування за датчиками освітленості

Таблиця 6 – Алгоритм з циклічного надсилання даних

Крок	Дія	Призначення
1.	Отримання/завантаження актуальних метеоданих.	Потрібні свіжі вхідні дані для прогнозу.
2.	Прогноз ML.	Виклик <code>ml_model.predict()</code> , отримання кутів.
3.	Форматування.	Перетворення кутів на рядок формату <code>H&lt;кут&gt;V&lt;кут&gt;\n</code> (наприклад, <code>H125V38\n</code> ).
4.	Надсилання.	Використання <code>pygame.wite()</code> для передачі на <code>Arduino</code> .
5.	Очікування.	Затримка ( <code>time.sleep()</code> ), яка відповідає інтервалу прогнозу (наприклад, 300 секунд).
6.	Повторення.	Повернення до кроку 1.

# ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ

**Структура капітальних інвестицій.** Загальна сума інвестицій у модернізацію та будівництво трекерної СЕС складає **3 944 981 грн.**

Основні статті витрат:

- Енергетичне обладнання: 1.17 млн грн
- Трекінгова система (Механіка та Приводи): ~1.2 млн грн
- Інфраструктура: ~660 тис. грн
- Монтаж та будівництво: ~737 тис. грн
- Експлуатаційні витрати на одного працівника для обслуговування системи стеження

Отже, попри вищі капітальні витрати на трекінгову механіку (порівняно зі стаціонарними системами), ефективність використання сонячної інсоляції дозволяє окупути проєкт у прийнятний термін (менше 8 років) при терміні служби обладнання 20+ років

Ціна виробленої електроенергії

$$C_{\text{вир}} = W_{\text{рвн}} \cdot C_{\text{ел,р}} \quad (4.12)$$

де  $W_{\text{рвн}}$  – вироблена виробленої електроенергії сонячною станцією;

$C_{\text{ел}}$  – ціна електроенергії для підприємств (непобутових споживачів) в

Україні

Таблиця 7 – Кошторисна вартість системи

Елементи електротехнічного комплексу	Ціна, грн.
Мережевий інвертор Huawei SUN2000-100KTL-M2 (100 кВт) (1 шт.)	233 750,02
Фотогальванічні панелі Trina Solar TSM-NEG21C.20 710W (180 шт.)	887 400
Пристрій керування SmartLogger 3000A (1шт.)	52 275,02
Кріплення СЕС: метал для побудови трекера (10 компл.)	580 000
Електропривод для побудови трекера (10 компл.)	613 770
Система керування сонячним трекером (10 компл.)	25 000
DC- PV 1×6 мм <sup>2</sup> — 1860 м; конектори MC4 — 280 шт.	128 880,89
АС-кола: АВВГ нгд 4×95 — 265 м;	127 730
Зв'язок: Cat. 5e F/UTP PE 4x2x24 – 500м	14 092,3
Щитові виробн: шафа 800×600×200 — 1 шт; шафа 400×500×200 — 1 шт.	145 680,02
Кабельні лотки та кріплення для прокладання: 50×50 — 100 м; 100×50 — 190 м;	180 351,13
Заземлення: вертикальні електроди D16×1500 — 16 шт; дріт Al D10 — 860 м; смуга 25×4 — 30 м.	205 917,20
Комутація та вимірювання: АВ 250 TMF 160А — 1 шт; ТТ 300/5 — 3 шт.;	12 455,6
<b>Загальна вартість СЕС</b>	<b>3 207 301,91</b>
Транспортні витрати та монтажні витрати (13%)	<b>416 949,25</b>
Витрати на будівельні роботи (10%)	<b>320 730,191</b>
Капітальні витрати (інвестиції) СЕС	<b>3 944 981,351</b>

$$C_{\text{вир}} = 113 205,80 \cdot 7,1 = 803 761,18 \text{ (грн.)}$$

Термін окупності розраховуємо за виразом:

$$T_{\text{ОК}} = \frac{C_{\Sigma} + C_{\text{ДМ}} + C_{\text{Б}}}{C_{\text{вир}} - C_{\text{В}}}$$

$$T_{\text{ОК}} = \frac{3 944 981,351 + 416 949,25 + 320 730,191}{803 761,18 - 208 418,09} = \frac{4 682 660,792}{595 343,09} = 7,8 \text{ (роки)}$$

# ВИСНОВКИ

Отже запропонована електромеханічна система керування сонячною фотоелектричною станцією, що містить інтегрований проактивний механізм на базі ML-прогнозування, являє собою високоефективне та економічно доцільне інженерне рішення. Ця система забезпечує суттєве збільшення енергетичної продуктивності фотоелектричних систем порівняно з конвенційними статичними конфігураціями, оскільки застосування двовісного трекінгу в поєднанні з інтелектуальними алгоритмами управління дозволяє досягти приросту річного виробітку електроенергії на 30–40% від її потенційної потужності.

Розрахунки які були здійснені, підтверджують високу результативність системи, прогнозуючи річне вироблення електроенергії у розмірі 113 205,80 кВт·год для масиву площею 60 м<sup>2</sup>. Основне вдосконалення полягає у зміні парадигми від неточного реактивного LDR-відстеження, яке є чутливим до атмосферних явищ, таких як хмарність і відблиски, та схильне до перманентних коливань, до проактивного керування. Останнє реалізується за допомогою моделей машинного навчання (наприклад, LSTM або Random Forest) для оптимального налаштування кута нахилу панелей, спираючись на прогнози погодних умов та хмарності. Зазначений механізм не лише оптимізує збір розсіяного сонячного випромінювання, а й сприяє зменшенню експлуатаційних витрат та подовженню терміну служби приводних механізмів шляхом мінімізації зайвих переміщень. Відповідно до представленого техніко-економічного обґрунтування, висока ефективність даної системи підтверджується відносно коротким терміном окупності (7,8 року), що засвідчує раціональність її імплементації на індустріальних об'єктах з метою забезпечення енергетичної незалежності

# НАУКОВЕ І ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАЦІВ

**Наукова новизна одержаних результатів.** Отримав подальший розвиток метод визначення положення сонячних панелей відносно сонця за допомогою машинного навчання

**Практичне значення одержаних результатів полягає у:**

- розробці схеми електричної принципової системи керування сонячної фотоелектричної станції;
- розробці алгоритму роботи пристрою відслідковування положення сонця;
- у виборі елементів електромеханічної системи керування;
- написанні програми керування відслідковувачем положення сонця.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення і результати досліджень доповідались та обговорені на VI Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками - ОКЕУ-2025» та на «LIV Всеукраїнській науково-технічній конференції факультету електроенергетики та електромеханіки (2025 р.)».

**Публікації.** За тематикою дослідження опубліковано тезу доповіді матеріалів

Електромеханічна система керування сонячної фотоелектричної станції [Електронний ресурс] / В. С. Бомбик, А. В. Коритний // Матеріали VI міжнародної науково-технічної конференції Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2025), Вінниця, 22-23 жовтня 2025 р. – Електронний ресурс. Режим доступу: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/924/1612/2930-1>

# ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: «Електромеханічна система керування сонячної фотоелектричної станції»

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота  
Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕПА-24м

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 26,8 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

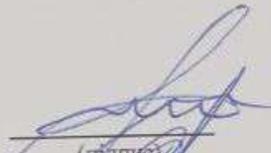
У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

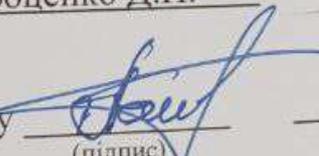
У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Зав. кафедри КЕМСК Мошноріз М.М.  
(прізвище, ініціали, посада)

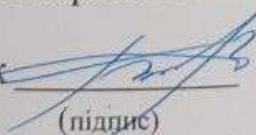
доцент кафедри КЕМСК Проценко Д.П.  
(прізвище, ініціали, посада)

  
(підпис)  
  
(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку   
(підпис)

Паянок О.А.  
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник   
(підпис)

Бомбик В.С.  
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач   
(підпис)

Коритний А.В.  
(прізвище, ініціали)

ВСЬОУНОВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ  
ОПТИМІЗАЦІЮ СХЕМ УНІФІКАЦІЇ

08-24.МКР.005.00.000

Електромеханічна система керування  
сонячної фотоелектричної  
станції

Літ. Маса Масштаб

Стадія Аркушів

ВНТУ, гр. ЕПА-24м

Зм.	Кіль.	Лист	Недок	Підпис	Дата
Розробив		Коритний А.В.			23.11
Перевірів		Бомбик В.С.			23.11
Т. контр.					
організації		Габелко І.В.			18.12
Н.контр		Бомбик В.С.			23.11
Затвердив		Мошноріз М.М.			